

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Protlačování slitiny AlMn1Cu klasickým a upraveným
kanálem ECAP

Extrusion AlMn1Cu Alloy through the Classical and
Modify Channel ECAP

Student: Michal Salajka

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Stanislav Rusz, CSc.

Ostrava 2009

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Salajka**
Studijní program: B2341 Strojnictví
Studijní obor: 2303R002 Strojnická technologie
Téma: **Protlačování slitiny AlMn1Cu klasickým a upraveným kanálem ECAP**
Extrusion AlMn1Cu Alloy through the Classical and Modify Channel ECAP

Zásady pro vypracování:

1. Provedte rešerši současného stavu vývoje technologií výroby materiálu s velmi jemnozrnnou strukturou.
2. Experimentálně ověřte protlačování slitiny AlMn1Cu nástrojem ECAP.
3. Ověřte vliv počtu průchodů na strukturu protlačovaného vzorku.
4. Provedte protlačování dané slitiny kanálem ECAP s vychýlením 10° v horizontálním směru.
5. Srovnajte dosaženou střední velikost zrna u kanálu ECAP bez vychýlení a s vychýlením po 1. a 3. a 5. průchodu (cesta Bc). Provedte celkové vyhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

Engineering Plasticity from Macroscale to Nanoscale, Conference Proceedings 6th Asia – Pacific Symposium on Engineering Plasticity and it's Applications, 2002, Part 1, Sydney – Australia, p. 468

ESTRIN. Y. Effects of Severe Plastic Deformation: Mechanical Properties and Beyond, Materials Science Forum, Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, Vol. 503 – 504 (2006), Trans Tech Publications, p. 91 – 98, Switzerland.

PARK, K. T. – LEE, CH. S. – KIM, Y. S. and SHIN, D. H. Superplastic Deformation of Ultrafine Grained Al Alloy Processed by ECAP and Post – Rolling, Materials Science Forum, Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, Vol. 503 – 504 (2006), Trans Tech Publications, p. 119 – 124, Switzerland.

SRINIVASAN (PI), R. – CHAUDHURY, P. K – CHERUKURI, B. – HAN, Q. – SWENSON, D. and GROS, P. Continuous Severe Plastic Deformation Processing of Aluminium Alloys, Final Technical Report, DOE Award Number: DE – FC36 – 01ID14022, 2006, p. 68.

VERLINDEN, B. – POPOVIC, M. Influence of Cu on the Mechanical Properties of an Al – 4.4wt%Mg Alloy after ECAP, Materials Science Forum, Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, Vol. 503 – 504 (2006), Trans Tech Publications, p. 107 – 111, Switzerland.

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Adresa trvalého pobytu studenta:

Javorová 1, 695 01 Hodonín, Česká republika

.....

podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

SALAJKA, M. Protlačování slitiny AlMn1Cu klasickým a upraveným kanálem ECAP. Ostrava: katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 51 s. Bakalářská práce, vedoucí: Rusz, S.

Bakalářská práce se zabývá protlačováním slitiny AlMn1Cu klasickým a upraveným kanálem ECAP. V úvodu práce je uvedeno několik metod vhodných k výrobě materiálů s jemnozrnnou strukturou, jedná se především o technologii ECAP, 3D – ECAP a TE. V práci jsou popsány oba experimenty protlačování slitiny AlMn1Cu nástrojem ECAP. Dále je popsán vliv počtu průchodů na strukturu protlačovaného materiálu. Na závěr je uveden vliv vychýlení kanálu u nástroje ECAP, kdy jsou porovnány dosažené střední velikosti zrna po 1. a 5. průchodu.

ANNOTATION OF BACHELOR'S THESIS

SALAJKA, M. Extrusion AlMn1Cu Alloy through the Classical and Modified Channel ECAP. Ostrava: Department of Mechanical Technology, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2009, 51 p. Bachelor Thesis, Head: Rusz, S.

The Thesis is dealing extrusion AlMn1Cu alloy through the classical and modify channel. In introduction is introduced a few methods useful to production materials with fine grained structure, behave about technology ECAP, 3D - ECAP and TE. In work are circumscribed both of them experiments extrusion AlMn1Cu alloy through the tool ECAP. Then is described influence number of passes on structure extrusion materials. The conclusions are given effect deflection channel ECAP, when are compared middle sizes grains achieved after 1. and 5. passes.

Obsah

Seznam použitých značek.....	9
Seznam použitých zkratk10	10
ÚVOD	11
1. SOUČASNÝ STAV VÝVOJE TECHNOLOGIÍ VÝROBY MATERIÁLŮ S VELMI JEMNOZRNOU STRUKTUROU	12
1.1 Protlačování rovnostranným rovinným kanálem ECAP.....	12
1.1.1 Účinek úhlu zaoblení přechodu Ψ	15
1.1.2 Účinek vnitřního poloměru r	18
1.1.3 Vývoj technologie ECAP.....	19
1.2 Technologie 3D – ECAP	20
1.2.1 Mechanické vlastnosti	23
1.2.2 Mikrostruktura.....	25
1.3 Technologie Twist Extrusion (TE)	26
1.3.1 Technologické vlastnosti TE	26
1.3.2 Experimentální výzkum kinematiky TE	27
1.3.3 Dvě roviny stříhu a čtyři deformační pásma v TE	27
1.3.4 Dvě hlavní cesty při TE.....	29
1.3.5 Struktura a vlastnosti materiálů v průběhu více-průchodů TE	30
1.3.6 Nové možnosti přicházející s TE	31
1.3.7 Srovnání TE a ECAP.....	32
2. PROTlačOVÁNÍ SLITINY AlMn1Cu NÁSTROJEM ECAP	33
2.1 Slitina hliníku AlMn1Cu (AW - 3003)	33
2.2 Mazivo GLEIT - μ° HP 515.....	33
2.3 Vlastní experiment protlačování nástrojem ECAP.....	34
2.4 Porovnání křivek přetvárného odporu pro jednotlivých průchodech.....	36
3. PROTlačENÍ SLITINY AlMn1Cu KANÁLEM ECAP S VYCHÝLENÍM 10° V HORIZONTÁLNÍM SMĚRU	38
3.1 Porovnání jednotlivých křivek přetvárného odporu.....	39

4. OVĚŘENÍ VLIVU POČTU PRŮCHODŮ NA STRUKTURU PROTLAČOVANÉHO VZORKU	41
4.1 Vliv počtu průchodů na strukturu protlačovaného vzorku u nástroje ECAP bez vychýlení.....	41
4.2 Vliv počtu průchodů na strukturu protlačovaného vzorku u nástroje ECAP s vychýlením 10°	42
5. SROVNÁNÍ STŘEDNÍ VELIKOSTI ZRNA U KANÁLU ECAP BEZ VYCHÝLENÍ A S VYCHÝLENÍM PO 1. A 5. PRŮCHODU CESTOU Bc	45
5.1 Srovnání střední velikosti zrna po prvním průchodu	45
5.2 Srovnání střední velikosti zrna po pátém průchodu	46
ZÁVĚR.....	47
Seznam použité literatury	50
Seznam příloh	51

Seznam použitých značek

Značka	Název	Jednotky
A5	Prodloužení	[%]
N	Počet průchodů	[-]
Rm	Pevnost v tahu	[Mpa]
Rp0,2	Mez pevnosti	[Mpa]
R_1	Vnější poloměr kanálu	[mm]
Z	Kontrakce	[%]
R_2	Vnitřní poloměr kanálu	[mm]
t_o	Teplota okolí	[°C]
v	Rychlost posuvu	[mm/min]
ϕ	Úhel přechodu dvou kanálů	[°]
ψ	Úhel délky zaoblení přechodu	[°]
α	Úhel rotace šroubovice	[°]
β	Úhel stoupání	[°]
ε	Deformace	[-]
$\mu\text{HV}0,1$	Tvrдость	[Mpa]
σ_p	Přetvárný odpor	[MPa]
$\sigma_{p\max}$	Maximální přetvárný odpor	[MPa]

Seznam použitých zkratek

CEC	Cyklické protlačování spojené s přechováním (Cyclic Extrusion Compression)
ECAP	Protlačování rovinným pravoúhlým kanálem (Equal Channel Angular Pressing)
ECAP-Conform	Kontinuální protahování rovnostranným pravoúhlým kanálem (Continuous Equal Channel Angular Pressing)
HPT	Kрут vysokým tlakem (High Pressure Torsion)
SAED	Elektronová difrakce (Selected Area Electron Diffraction)
SPD	Vícenásobná plastická deformace (Severe Plastic Deformation)
TE	Protlačování kanálem se zabudovanou šroubovicí (Twist Extrusion)
UFG	Velmi jemnozrnná struktura (Ultra Fine Grain)
3D-ECAP	Protlačování nástrojem s vícero na sebe navazujícími kanály typu ECAP

ÚVOD

Vývoj nanostrukturních materiálů patří v současné době k prioritním oblastem vědeckého výzkumu v oblasti materiálů i tvářecích technologií ve světě. Jedná se zejména o tváření neželezných kovů a jejich slitiny, jejichž výhodou je dobrá recyklovatelnost a snižování výrobních nákladů u výrobků z těchto materiálů. Roste význam jejich použití zejména v automobilovém průmyslu (Audi, Opel, Ford..), v lékařství, vojenském a kosmickém průmyslu.

Metody vícenásobné plastické deformace (Severe Plastic Deformation, SPD) pro výrobu jemnozrnných materiálů byly vyvinuty na počátku 80-tých let v Rusku. Nejlepší z těchto metod pro produkci velkého objemu výroby je protahování nebo protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem (Equal Channel Angular Pressing, ECAP/P). Dnešní SPD výroba se rychle vyvíjí a je na pokraji přechodu od laboratorního výzkumu ke komerční výrobě. SPD materiály jsou prezentovány jako pokročilé konstrukční a funkční materiály, jako další generace kovů a slitin. SPD se stává jedním z nejaktivnějších rozvojových oblastí.

SPD je tvářecí technologie, která využívá velkých tlaků k tvorbě velmi vysokých plastických deformací, k následné produkci ultra jemného zrna materiálu bez významné změny rozměrů polotovaru. Mezi nejvýznamnější SPD procesy patří *krut spojený s vysokým tlakem* (High Pressure Torsion, HPT), *protlačování pravoúhlým rovinným kanálem* (Equal Channel Angular Pressing, ECAP), *kontinuální protahování rovnostranným pravoúhlým kanálem* (Continuous Equal Channel Angular Pressing, ECAP-Conform), *cyklické protlačování spojené s přechováním* (Cyclic Extrusion Compression, CEC) a další. Každý proces má jedinečné vlastnosti určené k jeho použití ve výzkumu a praxi. V mé práci bude zmíněn především proces ECAP, který patří mezi nejvíce zkoumané technologie. Mezi další zmíněné technologie bude patřit *protlačování kanálem se šroubovicí* (Twist Extrusion, TE) a *protlačování nástrojem s vícero na sebe navazujícími kanály typu ECAP* (3D-ECAP), což jsou nově vyvíjené a zkoumané technologie SPD.

1. SOUČASNÝ STAV VÝVOJE TECHNOLOGIÍ VÝROBY MATERIÁLŮ S VELMI JEMNOZRNOU STRUKTUROU

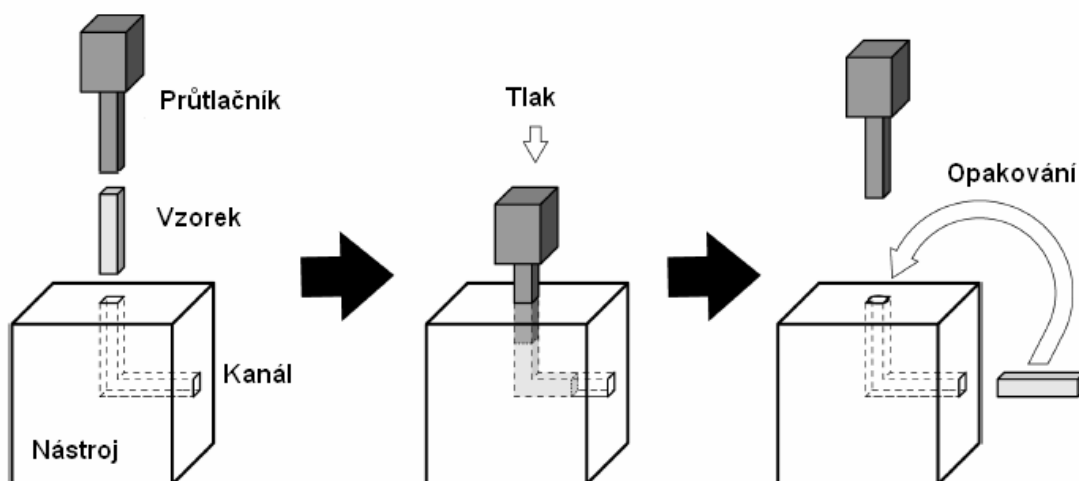
Vývoji metod vhodných k výrobě materiálů s velmi jemnozrnnou strukturou, byla věnována pozornost minulých 20 let. Tyto materiály se na základě velikosti zrna dělí na velmi jemnozrnné materiály (Ultra Fine Grain, UFG) s průměrem zrna řádově 100 nm – 1000 nm a nanomateriály s průměrem zrna menším než 50 nm. Velmi jemnozrnné materiály se vyznačují především vysokou pevností při nízkých tvářecích teplotách při zachování velmi dobré tvářitelnosti. Touto kombinací vlastností se UFG materiály stávají velmi atraktivními pro tvářené polotovary, které při dalším zpracování jsou zachovány až do finálních operací [1].

Technologie výroby UFG materiálů využívá především velké plastické deformace. Procesy technologií vícenásobné plastické deformace mohou být definovány jako procesy, které v kovu vyvolají velmi vysoký stupeň deformace za účelem zjemnění zrna .

Dnešní SPD výroba se rychle vyvíjí a je na pokraji přechodu od laboratorního výzkumu ke komerční výrobě. SPD materiály jsou prezentovány jako pokročilé konstrukční a funkční materiály s velkým komerčním potenciálem. SPD se stává jednou z nejaktivnějších rozvojových oblastí.

1.1 Protlačování rovnostranným rovinným kanálem ECAP

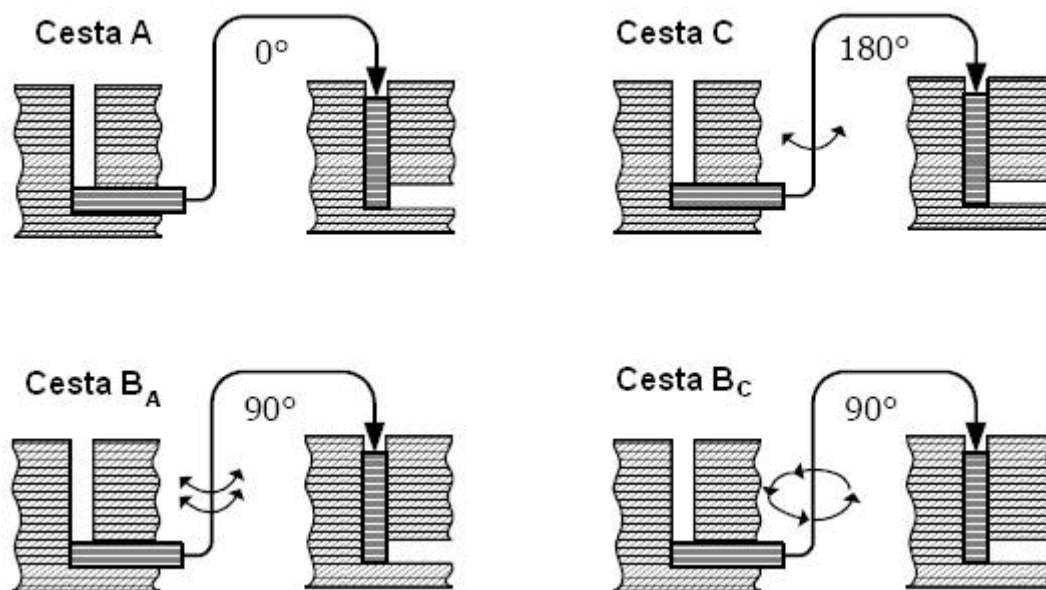
ECAE známý také jako ECAP, byl vynalezen V. M. Segalem a jeho spolupracovníky v roce 1977 v Rusku. ECAP je jedním z předních a nejvíce vyšetřovaných procesů kvůli jeho jedinečným schopnostem produkování jednotné celkové deformace pro průmyslové aplikace. Proces ECAP vyžaduje protlačení vzorku přes nástroj s vnitřním kanálem, který má L profil, jak je vidět na obr. 1.1. Vzorek je vložen shora do svislé části kanálu a následně protlačen nástrojem. Takto protlačovaný materiál je vystaven vysokému stupni deformace.



Obr. 1.1 Princip technologie ECAP.

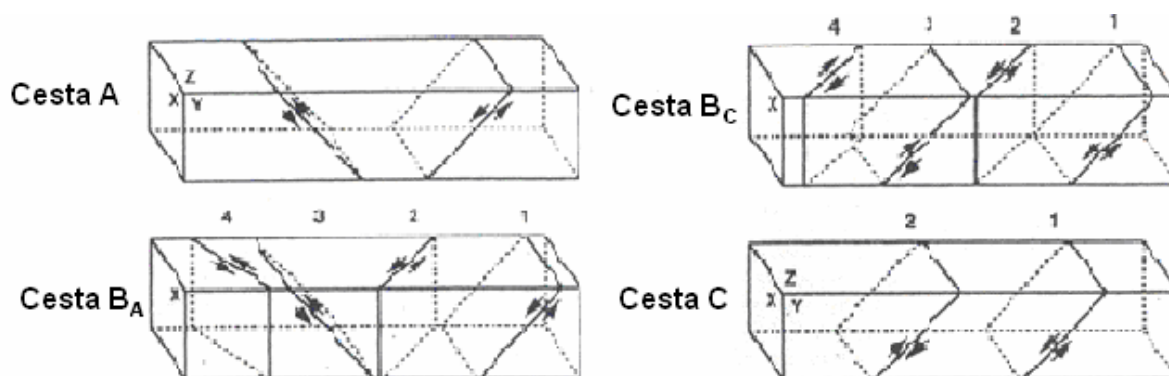
Velikost deformačního napětí na vzorku při průchodu rovinou stříhu je závislá na dvou úhlech: hlavní vliv má úhel Φ mezi dvěma protínajícími se částmi kanálu, menší vliv má úhel zaoblení přechodu Ψ . Úhel Φ se pohybuje v rozmezí $90^\circ - 135^\circ$. Často používané úhly jsou $\Phi = 90^\circ$ a $\Psi = 20^\circ$, každý průchod navíc odpovídá deformaci rovné přibližně 1 [2]. Pro dosažení výsledné struktury materiálu a jeho vlastností jsou významné tyto faktory: geometrie nástroje, velikost a rychlost deformace, počet průchodů kanálem, teplota procesu, mazání a cesta zpracování.

Důležitou charakteristikou procesu ECAP je, že zde nedochází k žádné změně příčného průřezu vzorku při průchodu nástrojem. V průběhu procesu je velmi důležitý (pro dosažení výsledné mikrostruktury) směr a otáčení vzorku mezi jednotlivými za sebou jdoucími průchody. K tomu, aby se dosáhlo požadované velikosti deformace, je vzorek opakovaně protlačen ve stejném nástroji. Byly určeny čtyři základní cesty protlačení (obr. 1.2), které jsou nazvány cesta A, B_A, B_C a C.



Obr. 1.2 Zobrazení cest protlačení pro ECAP.

Cesta A je používána pro zpracování materiálů s precipitáty podélného tvaru, kde je vzorek opakovaně protlačen bez jakéhokoliv otočení. Pro získání homogenních mikrostruktur s velkým úhlem hranic zrn je vhodná cesta B_C, kde je otočení o 90° mezi každým průchodem. Cesty B_A a B_C se otáčejí o 90°, rozdíl je ve smyslu otáčení mezi jednotlivými protlačeními. Cesta C odkazuje na otočení o 180° při každém průchodu. Některé výzkumy uvádějí, že cesta B_C je o 40% efektivnější než cesta C a téměř o 50% efektivnější než cesta A [3]. Bylo také dokázáno, že pro produkci homogenní struktury materiálu je nejvýhodnější čtyřnásobné protlačení cestou B_C. K odstranění malých úhlů hranic zrn a získání úhlů větších je zapotřebí šesti a vícenásobné protlačení [1]. Na obr. 1.3 jsou znázorněny střižné roviny u jednotlivých cest protlačování závislé na počtu průchodů.



Obr. 1.3 Zobrazení střižných rovin.

Při opakovaném průchodu nástrojem ECAP dochází k vytváření nových střižných rovin a jejich vzájemnému protínání. Výsledkem tohoto procesu je zjemnění střední velikosti zrna, v důsledku nahromadění velkého množství deformace. Rovnice pro výpočet deformace po jednom průchodu je uvedena níže (1) [1]. Z rovnice vyplývá, že velikost deformace je závislá na úhlech Φ a Ψ . Pro N průchodů je rovnice upravena do tvaru (2) [1]. Je dokázáno, že deformace nahromaděná uprostřed protlačeného vzorku je přidána od dalšího průchodu.

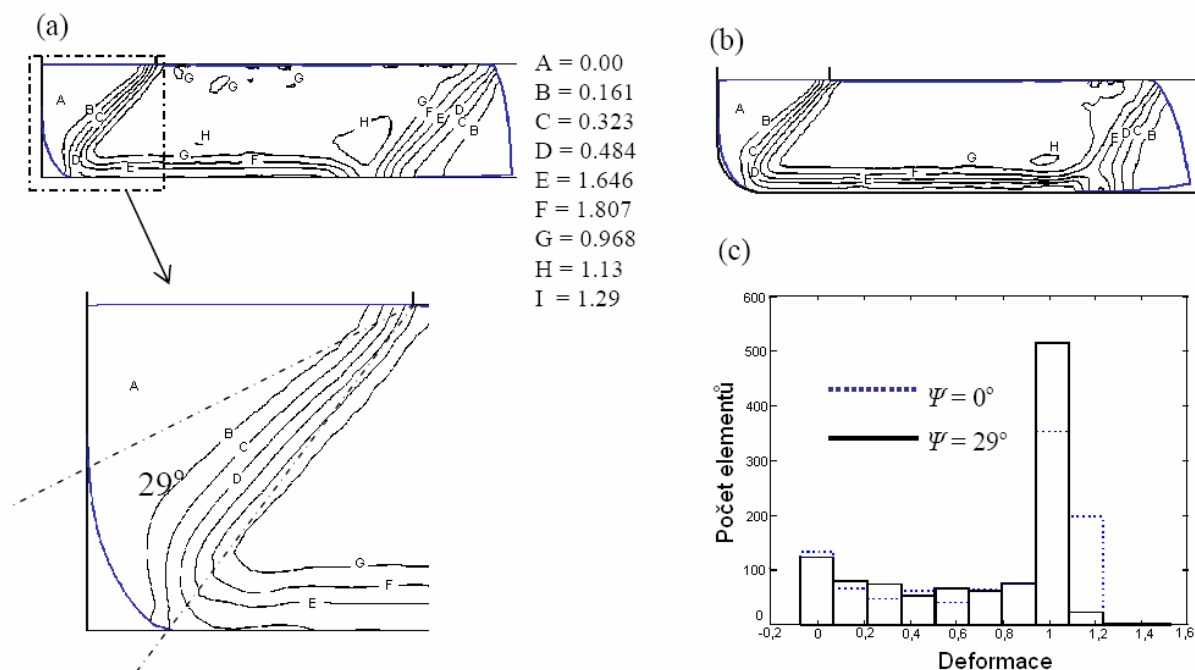
$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left[2 \cdot \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \cos ec\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right] \quad (1)$$

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \cdot \left[2 \cdot \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \cos ec\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right] \quad (2)$$

1.1.1 Účinek úhlu zaoblení přechodu Ψ

Analýza konečných prvků jednotlivých průchodů ECAP při teplotě okolí byla provedena za podmínek rovinného přetvoření použitím FE Softwaru DEFORM – 2D. Vzorek s rozměry 12,7 mm × 50,8 mm byl rozdělen na 1000 čtyř uzlových elementů.

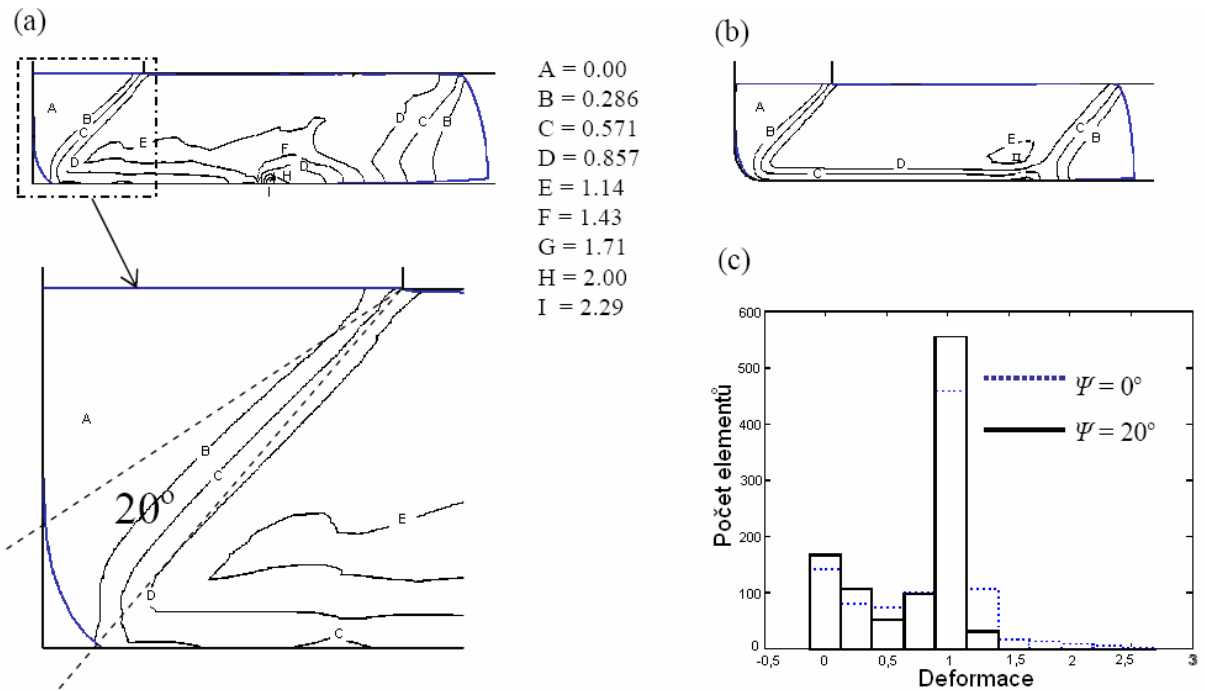
Deformace vypočítané z rovnice (1) jsou nadhodnocená v případech, když se vytvoří rohová mezera mezi vzorkem a nástrojem. Tato rohová mezera je způsobena zpevňovacím režimem vzorku a přechovací rychlostí procesu ECAP [4]. Obr. 1.4a ukazuje tvoření rohové mezery a deformační rozložení pro $\Psi = 0$, $R_2 = 0$ a nulové třecí podmínky. Změřený rohový úhel je asi 29°, pro $\Psi = 0$ a $R_2 = 0$, jak je ukázáno na obr. 1.4a. Rozložení pole deformace pro korigovaný úhel nástroje $\Psi = 29^\circ$ je zobrazené na obr. 1.4b



Obr. 1.4 Rozložení deformace pro nulové tření ($m = 0$) (a); tvoření rohové mezery pro $\Psi = 0^\circ$ a $R_2 = 0$ (b); korigovaný úhel nástroje $\Psi = 29^\circ$ a $R_2 = 0$ (c); histogram zobrazující deformační rozdělení pro $\Psi = 29^\circ$ a $\Psi = 0^\circ$ pro 1000 čtyř uzlových elementů.

K porovnání deformačního rozložení, pro podmínky zmíněné výše je vytvořen histogram, jak je znázorněno na obr. 1.4c. Počet konečných prvků je zakreslen v závislosti na rozsahu deformace. Po úpravě úhlu nástroje jsou velké deformační oblasti eliminovány, tudíž nastává zvýšení deformační stejnorodosti.

Obr. 1.5 ukazuje rozložení deformačních polí pro třecí podmínku ($m = 0.2$). Změřený rohový úhel je asi 20° pro $\Psi = 0^\circ$ a $R_2 = 0$, jak je ukázáno na obr. 1.5a. Deformační rozložení pro opravený úhel nástroje $\Psi = 20^\circ$ je zobrazené na obr. 1.5b. Počet konečných prvků je zakreslený v závislosti na rozsahu deformace na obr. 1.5c. U $\Psi = 0^\circ$, některé elementy na vnější straně povrchu vzorku obsahují velké deformace (více než $\epsilon \sim 1.5$, jak je vidět na obr. 1.5a a obr. 1.5c) způsobující nehomogenní deformaci. Po korekci úhlu nástroje $\Psi = 20^\circ$, jsou elementy s velkou deformací eliminovány, tudíž roste deformační homogenita [4].



Obr. 1.5 Deformační rozložení pro tření $m = 0,2$ (a); tvoření rohové mezery pro $\Psi = 0^\circ$ a $R_2 = 0$ (b); korigovaný úhel nástroje $\Psi = 20^\circ$ a $R_2 = 0$ (c) histogram zobrazující deformační rozdělení pro $\Psi = 20^\circ$ a $\Psi = 0^\circ$ pro 1000 čtyř uzlových elementů.

Maximální deformace, průměrná deformace a změna velikosti deformace (vypočtená použitím rovnice 3) pro různé podmínky jsou obsažené v tabulce 1.1.

$$S_w^2 = N \cdot \frac{\sum_{i=1}^N w_i (\varepsilon_i - \varepsilon_{aw})^2}{(N-1) \cdot \sum_{i=1}^N w_i} \quad (3)$$

, kde S_w^2 je posuzovaná velikost deformační změny, N je počet elementů, w_i je váha i - tého elementu, ε_i je deformace v i -tém elementu a ε_{aw} je průměrná deformace vybrané oblasti.

Průměrná deformace se snižuje, když se zvyšuje úhel Ψ a jak očekáváme, tak i maximální deformace se snižuje. Změna velikosti deformace se snižuje s měnícím se úhlem zaoblení přechodu Ψ redukujícího rohovou mezeru pro oba případy tření. Jak je očekáváno se zvyšujícím třením se zvyšuje velikost deformační změny. Optimální hodnoty Ψ a R_2 jsou, když je deformační distribuce homogenní (deformační rozdíl se blíží 0) a střední velikost deformace (dle výše znázorněných

oblastí deformace) se blíží teoretické deformaci [4].

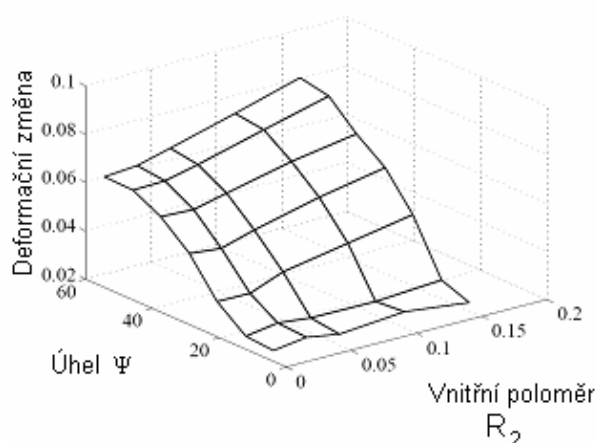
Tab. 1.1 Průměrná deformace, maximální deformace a deformační změna pro různé geometrie nástroje.

Ψ [°]	R_2 [mm]	Tření - m	Průměrná deformace	Maximální deformace	Změna deformace
0	0	0	0,75	1,31	0,1625
29	0	0	0,71	1,44	0,1544
0	0	0,2	0,83	2,57	0,1959
20	0	0,2	0,76	1,22	0,1769

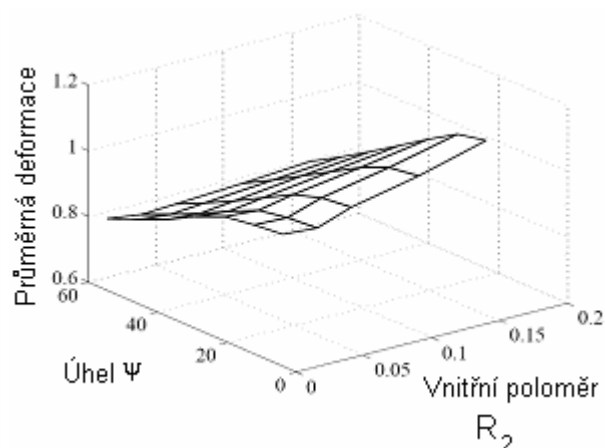
1.1.2 Účinek vnitřního poloměru R_2

Účinek vnitřního poloměru r na deformační rozložení byl studován porovnáním deformační změny a průměrné deformace pro různé hodnoty Ψ a R_2 . Rozdíl v deformační změně a průměrné deformaci je představován jako funkce Ψ a R_2 , jak je ukázáno na obr. 1.6.

Velikost deformační změny byla určena pro vybranou oblast 12.7 mm × 25.4 mm, velikost a tvary pro malé deformační oblasti (přední a zadní konec) jsou různé. Pro $R_2 = 0$ a zvyšující se úhel Ψ se deformační změna zvyšuje, zatímco průměrná deformace se snižuje. To je způsobené menší deformací na vnější straně povrchu. Pro menší hodnoty úhlu Ψ (menší než 29°) simulace neukázala skoro žádné zvýšení deformační změny. Průměrná deformace se značně zvyšuje od 0.99 do 1.14 s rostoucím vnitřním poloměrem R_2 , jak je vidět na obr. 1.6a a obr. 1.6b. To signalizuje získání velkých deformací bez velkých ztrát v deformační homogenitě. Pro velké úhly Ψ (větší než 29°) se deformační změna zvyšuje, zatímco průměrná deformace klesá. To signalizuje nerovnoměrné rozložení deformace. Velké hodnoty úhlu Ψ a R_2 ukazují, že na vzorek působí spíše ohyb než střížná deformace [4].



Obr. 1.6a Deformační změna.

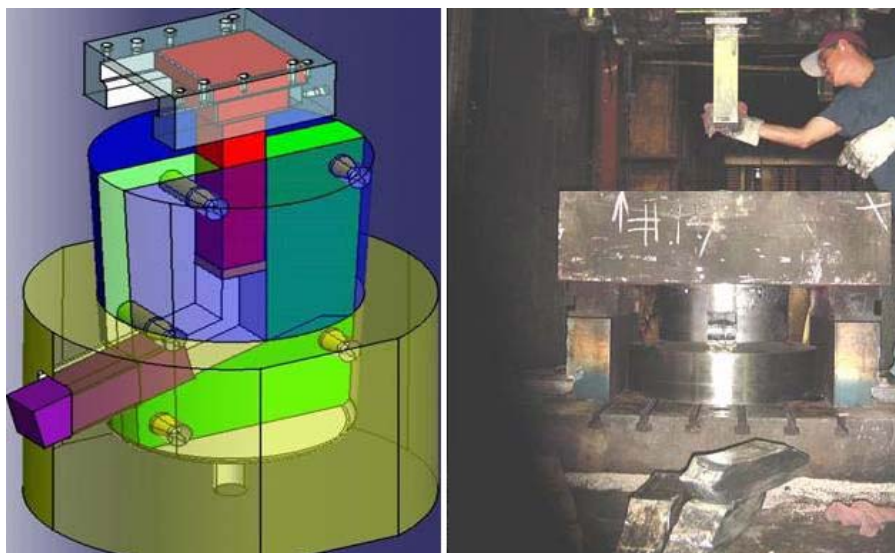


Obr. 1.6b Průměrná deformace.

Pro tření $m = 0.2$ a malý úhel Ψ se velikost deformační změny a průměrné deformace zvyšuje se zvýšením vnitřního poloměru R_2 . To ukazuje, že velké nerovnoměrné deformace jsou získány s vyšším třením. Pro velké úhly Ψ a $m = 0.2$ se deformační změna zvyšuje a průměrná deformace se snižuje. Jsou získány malé a nesterjnorodé deformace [4].

1.1.3 Vývoj technologie ECAP

Další vývojový směr metody ECAP je zvětšování rozměrů nástroje ECAP. Většina experimentálních potlačení ECAP využívala vzorky velikosti $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ a menší. V laboratoři US Air Force Research Laboratory v Ohio byl zkonstruován nástroj ECAP, kde je možné protlačit vzorky velikosti $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$. Dalším krokem bylo vyrobení segmentového nástroje, kde lze protlačit vzorek o velikosti $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$. Kanály v nástroji svírají úhel $\Phi = 105^\circ$. Nástroj je upevněný na 2000 t hydraulickém lisu a poskytuje UFG materiál, který se dá použít k zhotovení velkorozměrových výkovků [1]. Model nástroje a lis je zobrazen na obr. 1.7.

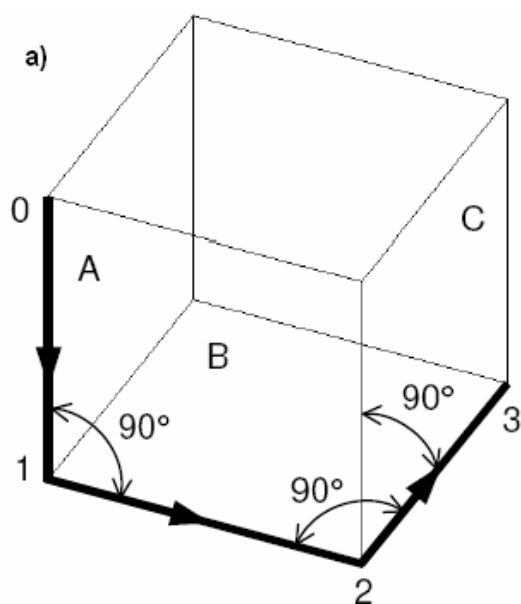


Obr. 1.7 Ukázka modelu nástroje ECAP a lisu (jdou vidět i protlačené vzorky).

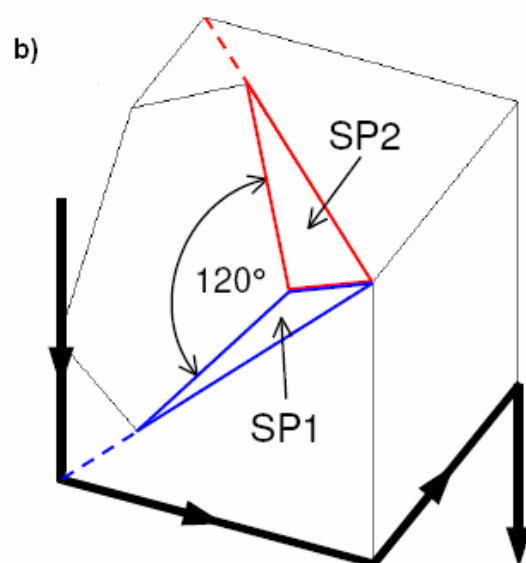
1.2 Technologie 3D – ECAP

Klasický ECAP s jedním kanálem L profilu je nedostatečný, protože musí být několikrát opakovaný, aby dosáhl požadované strukturální změny materiálu během procesu. Nový koncept 3D-ECAP se odchýlil od vzoru jednoho rovinného kanálu, a proto umožňuje uskutečnění cesty B_C bez vyjmutí vzorku z nástroje.

3D-ECAP byl navržený pro cestu B_C . Od klasické cesty B_C převzal otočení vzorku vně razidla o 90° . Nástroj obsahuje nejméně dva kruhové kanály se dvěma rovinami orientovanými o 90° proti sobě, jak je ukázáno pro rovinu A (0 - 1 - 2) a rovinu B (1 - 2 - 3) na obr. 1.8a. Jestliže je doplňující úhel mezi kanálovými průchody 90° , pak prostorové uspořádání materiálové trajektorie 0 - 1 - 2 - 3 odpovídá hranám krychle u obr. 1.8a. Obrázek 1.8b zobrazuje orientaci střižných rovin SP1 vyplývající z prvního otočení kanálu a střižné roviny SP2 z druhého otočení. Tyto roviny stříhu jsou natočeny v úhlu 120° (nebo 60°) proti sobě [5].

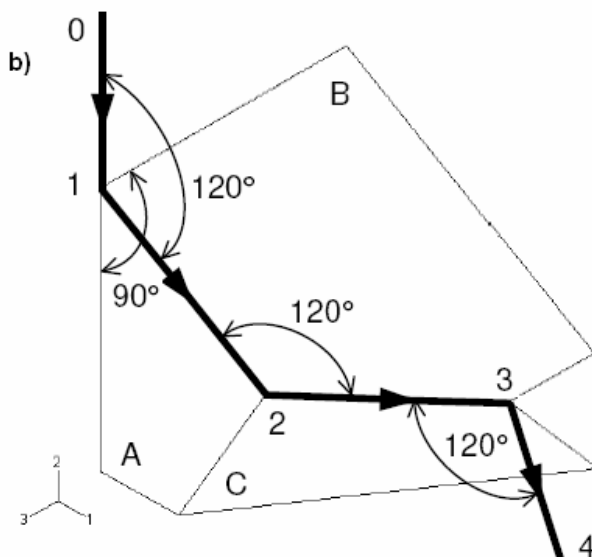
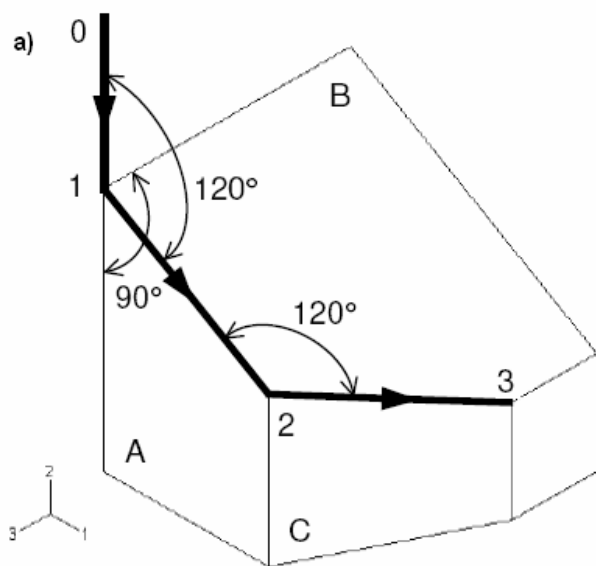


Obr. 1.8a Koncept 3D-ECAP s 90° vnitřní rotací pro dva kolmé kanály.



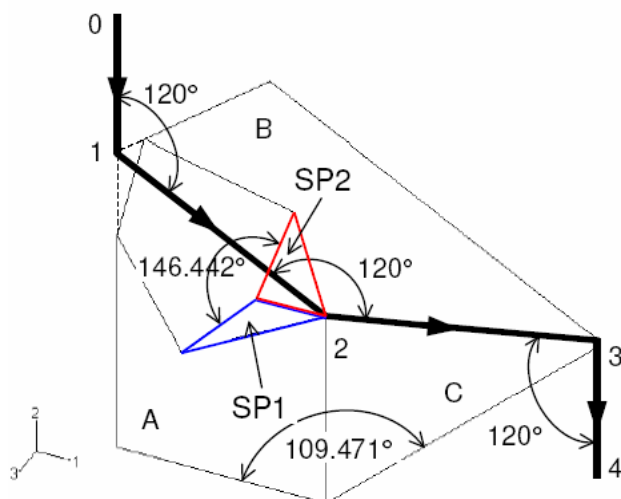
Obr. 1.8b Zobrazení střižných rovin SP1 a SP2.

3D - ECAP s 90° vnější rotací může být rozšířen kanály s úhlem mezi kanálovými průchody jiným než 90° . Obrázek 1.9a popisuje případ pro dvě kolmé kanálové roviny A a B s úhlem 120° mezi souslednými kanálovými průchody 0-1-2-3. Nástroj s třemi kanály vyžaduje rovinu C kolmou k rovině B, jak je znázorněno na obr. 1.9b. To komplikuje tvar razidla používaného pro tento proces [5].



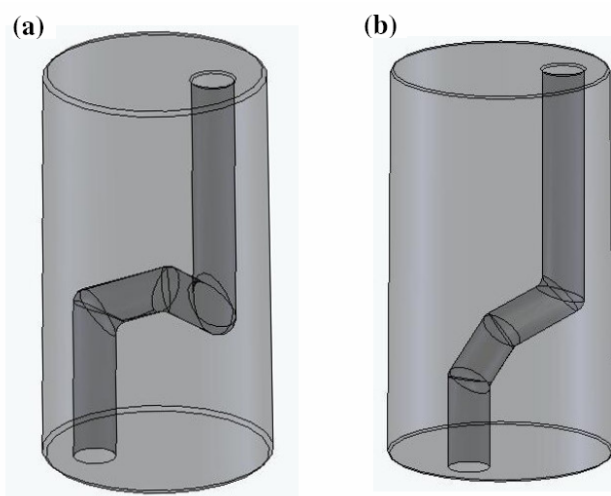
Obr. 1.9 Návrh nástroje 3D – ECAP s 90° vnitřní rotací pro dva kanály vychýlené o 120° (a); tři kanály vychýlené o 120° (b).

Pro vyhnutí se této komplikace je nutné se vzdát 90° vnitřní rotace nástroje. Obrázek 1.10 ukazuje takový případ s úhly mezi všemi rovinami 109.471° . To má také za následek, že úhel mezi rovinami stříhu SP1 a SP2 je 146.442° nebo 33.558° .



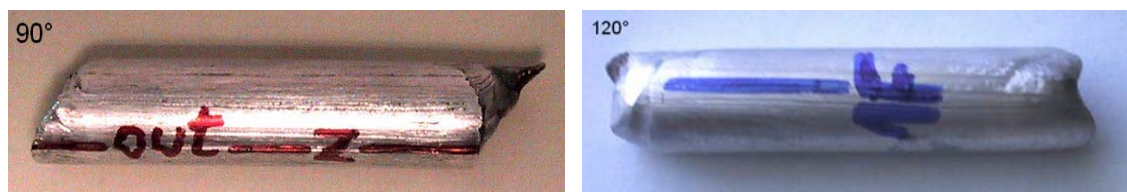
Obr. 1.10 3D - ECAP s $109,5^\circ$ vnitřní rotací pro tři kanály vychýlené o 120° .

Obr. 1.11 ukazuje schématický pohled na vložku objímky. Pro snížení velikosti vloženého nástroje je přístup ke kanálu mimo osu. To požaduje vhodné opatření ke kompenzaci excentrického zatížení. Množství ekvivalentního plastické deformace vytvořeného v materiálu po jednom průchodu závisí na polovině úhlu Φ mezi kanály [5].



Obr. 1.11 Zobrazení modelu nástroje pro 3D-ECAP s 90° vnitřní rotací (a) a 120° vnitřní rotací (b).

Zpracování čistého hliníku (Al 1070) bylo provedeno při teplotě 20 °C a za konstantní rychlosti 1mm/s pro oba 3D - ECAP nástroje. Rozměry vzorku byly Ø10 mm - 45 mm pro 90° kanál a Ø10 mm - 48 mm pro 120° kanál. Celková délka kanálu byla několikrát větší než délka vzorku, dva až tři vzorky zůstávaly uvnitř nástroje. Vzorky byly mazány teflonem a lanolínem. Tvary vzorků po průchodu 3D - ECAP nástrojem jsou zobrazeny na obr. 1.12.



Obr. 1.12 Vzorky protlačené 90° a 120° kanálem.

Pro klasický nástroj ECAP s 90° a 120° kanálem je po jednom protlačení materiálu docíleno deformace $\varepsilon = 1,15$, respektive $\varepsilon = 0,67$. Po jednom protlačení materiálu 3D – ECAP nástrojem s 90° a 120° kanálem je deformace $\varepsilon = 3,45$, respektive $\varepsilon = 2$. Pro získání větší deformace byl proces opakován. Maximální deformace dosažené po třech průchodech 90° kanálem je 10,35 a po pěti průchodech 120° kanálem je deformace 10 [5]. Shrnutí hodnot deformace jsou uvedeny v tabulce 1.2.

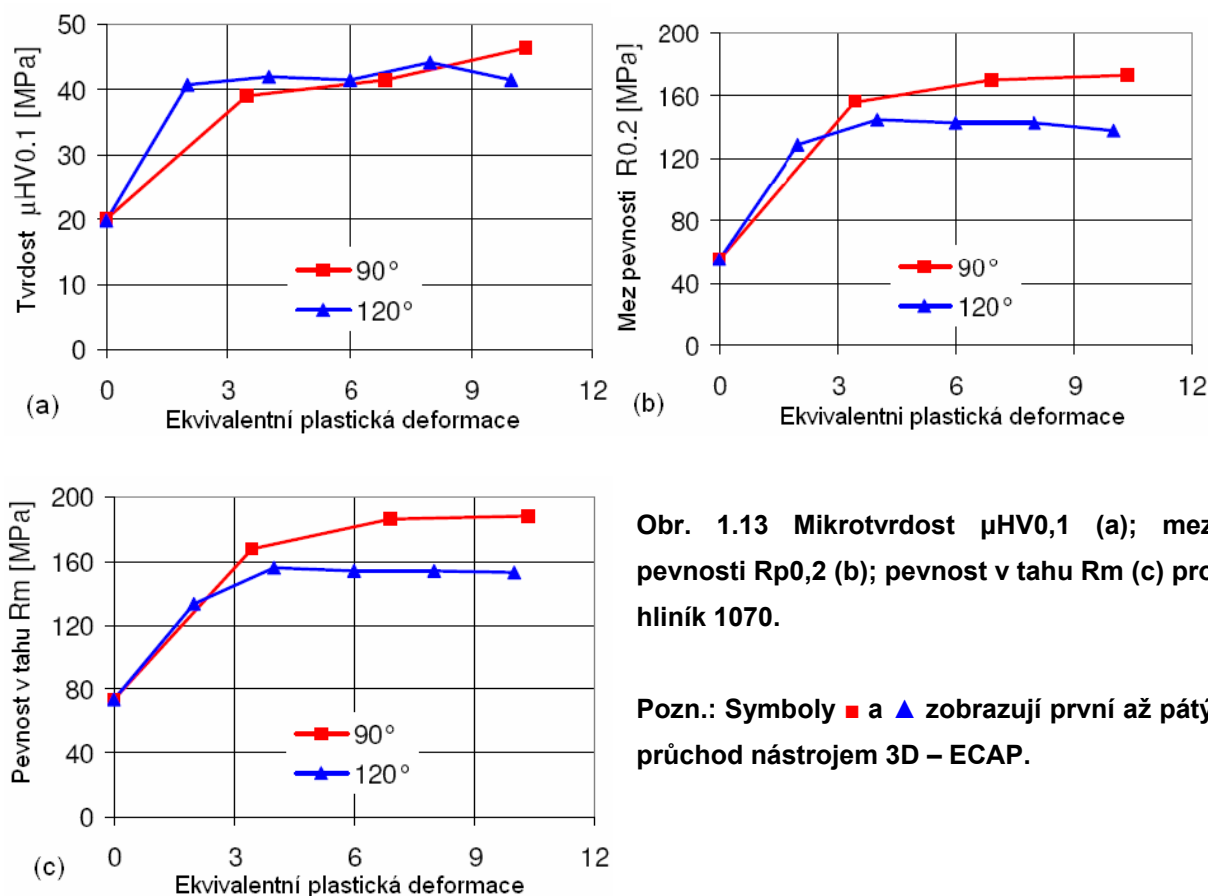
Tab. 1.2 Ekvivalentní plastická deformace pro 90° a 120° kanál nástroje 3D – ECAP.

	1. protlačení	2. protlačení	3. protlačení	4. protlačení	5. protlačení
90° kanál	3,45	6,90	10,35	-	-
120° kanál	2	4	6	8	10

1.2.1 Mechanické vlastnosti

Kromě měření standardní mikrotvrdosti byla provedena tahová zkouška pro vzorky nařezané ze zpracovaného materiálu. Vzorek měl rozměry Ø2,5 mm - 12,5 mm. Následující hodnoty prezentují mechanické vlastnosti hliníku 1070 zpracovaného 3D – ECAP nástrojem s 90° a 120° kanálem jako funkce ekvivalentní deformace.

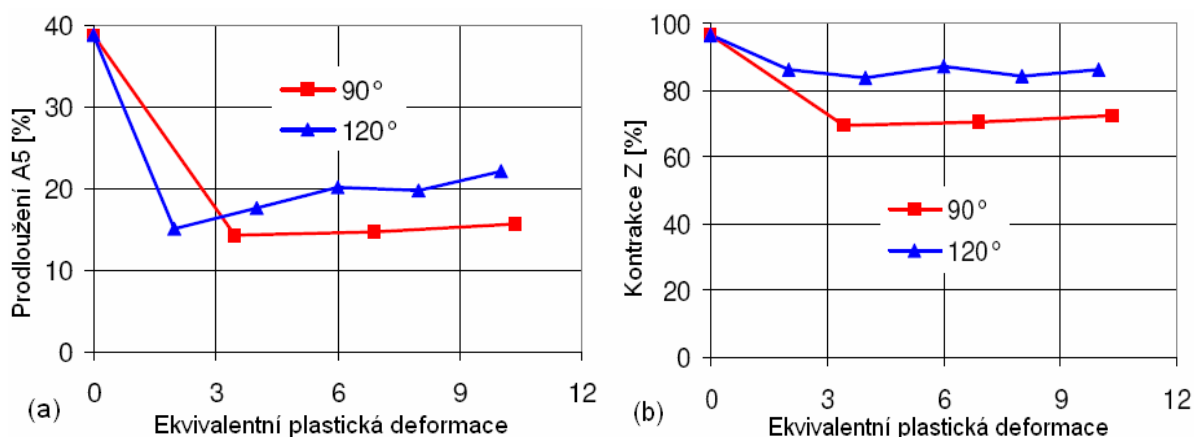
Zatímco mikrotvrdost $\mu\text{HV}_{0,1}$ (obr. 1.13a) je podobná u obou případů, mez kluzu $R_{p0,2}$ (obr. 1.13b) a pevnost v tahu R_m (obr. 1.13c) je nižší pro 120° kanál. Tento rozdíl dosahuje 20% pro maximální deformaci 10. Pro deformaci větší než 4 materiál protlačený 120° kanálem neukazuje žádné zpevnění nebo dokonce vykazuje nepatrné snížení $R_{p0,2}$ a R_m , zatímco materiál protlačený 90° kanálem je stále zpevňovaný [5].



Obr. 1.13 Mikrotvrdost $\mu\text{HV}_{0,1}$ (a); mez pevnosti $R_{p0,2}$ (b); pevnost v tahu R_m (c) pro hliník 1070.

Pozn.: Symboly ■ a ▲ zobrazují první až pátý průchod nástrojem 3D – ECAP.

Obr. 1.14a, 1.14b objasňují změny v tažnosti představované vzorovým prodloužením A5, kontrakce Z. Ve všech případech se tvárnost zpočátku snižuje a potom se stabilizuje nebo dokonce mírně zvyšuje s rostoucí deformací [5].

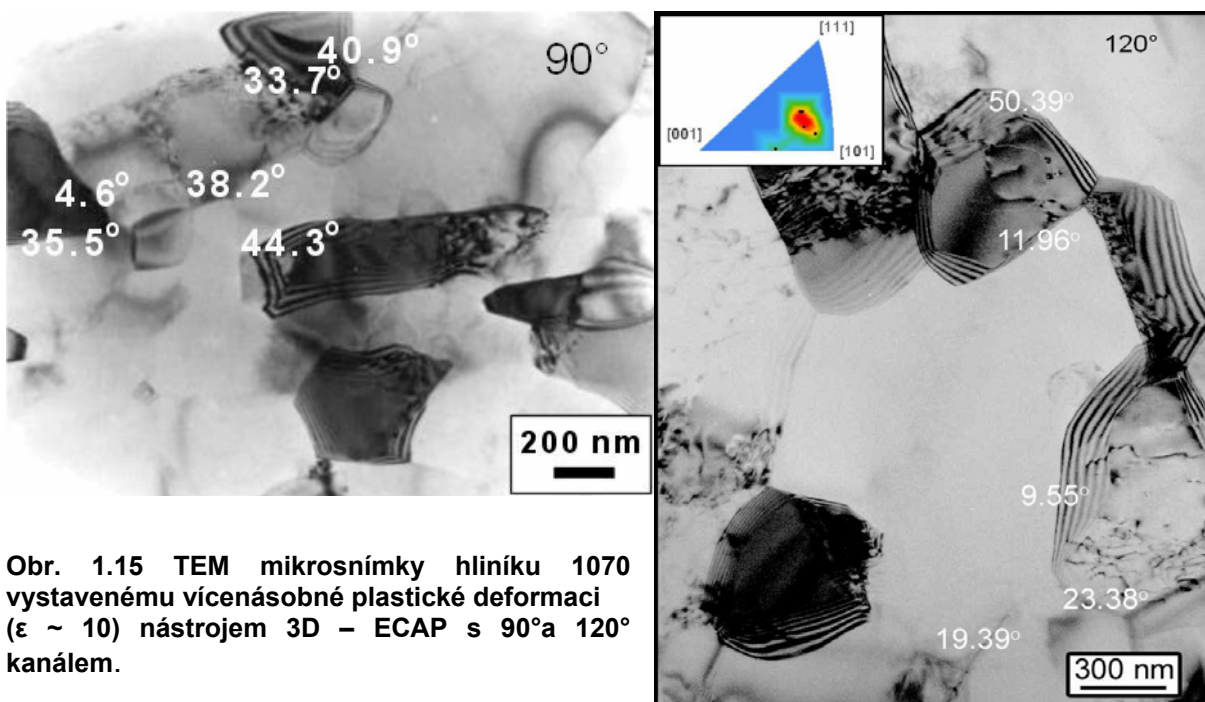


Obr. 1.14 Prodloužení A5 (a); kontrakce Z (b) pro hliník 1070.

Pozn.: Symboly ■ a ▲ zobrazují první až pátý průchod nástrojem 3D – ECAP.

1.2.2 Mikrostruktura

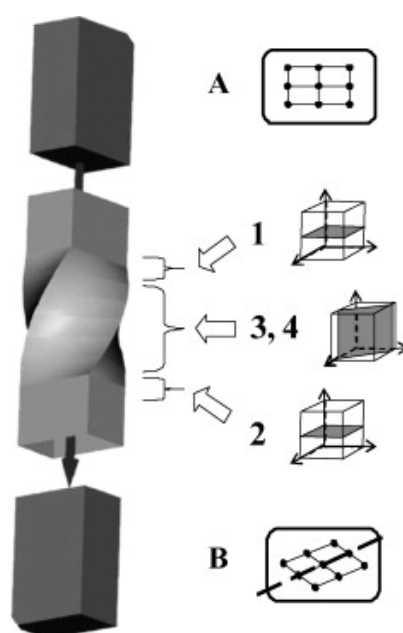
Mikrostruktura materiálu po obou procesech je podobná (obr. 1.15). Průměr zrn po ECAP skrz 120° kanál jsou mírně větší a charakterizované nižší dezorientací úhlů ve srovnání s 90° kanálem. Stereografický trojúhelník signalizuje krystalografickou strukturu.



Obr. 1.15 TEM mikrosnímky hliníku 1070 vystavenému vícenásobné plastické deformaci ($\epsilon \sim 10$) nástrojem 3D – ECAP s 90° a 120° kanálem.

1.3 Technologie Twist Extrusion (TE)

TE je založené na protlačení vzorku hranolového průřezu přes nástroj s profilem skládající se ze dvou hranolových částí se zabudovanou šroubovicí (obr. 1.16). Při TE nedohází ke změně původního příčného průřezu. Tato vlastnost dovoluje vzorek opakovaně protlačit, aby se nahromadila deformace potřebná ke změně mikrostruktury a mechanických vlastností materiálu vzorku.



Obr. 1.16 Schéma principu TE. Čísla 1 – 4 ukazují pozici čtyř deformačních pásem.

TE může být považováno za trojrozměrnou možnost HPT. Nicméně, z technologického hlediska je TE rovnostranné kanálové protlačování podobně jako ECAP. TE má řadu charakteristických rysů v deformačním stavu a technologická realizace procesu je atraktivní pro výzkum a aplikaci.

1.3.1 Technologické vlastnosti TE

1. Velikost ukončení deformované oblasti vzorku na vstupní a výstupní části vzorku je mnohem menší u TE než u ECAP. Jedná se o vlastnost, která je důležitá pro opakovní průchodu.
2. Změna profilu vzorku se děje v centrální části axiálního kanálu.

3. TE může být snadno nainstalováno na standardní vybavení lisu nahrazením klasického nástroje za nástroj s rotačním kanálem (šroubovicí).
4. Nástroj (TE) nemění směr pohybu vzorku, což dovoluje snadné zařazení do již existujících nástrojů na lisech a tímto i začlenění zařízení do výrobní linky [6].

1.3.2 Experimentální výzkum kinematiky TE

Pro experimentální studii kinematiky toku kovu během TE byl použit vzorek s devíti vlákny uloženými podél jeho hlavní osy. Vzorek byl protlačovaný nástrojem se zabudovanou šroubovicí, dokud nebylo dosaženo ustáleného toku. Poté byl vzorek vyjmut z nástroje a příčně rozřezán. V příčném řezu bylo získáno devět ukazatelů, které byly použity pro rekonstrukci odpovídající experimentální linii toku. Dosažené výsledky byly použity pro vytvoření vhodného teoretického modelu rozložení průtokové rychlosti v procesu protlačování [6]. Model propojuje dvě fyzikální omezení:

1. tečení kovu je omezené povrchem nástroje
2. objem zůstává konstantní

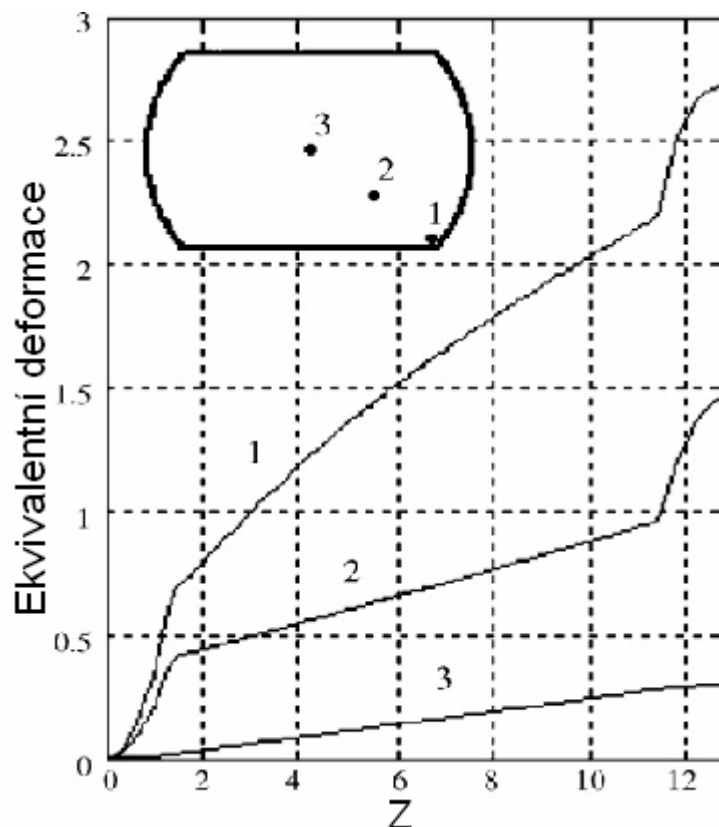
Získaný rozsah průtokové rychlosti je pak použit pro nalezení napětového stavu použitím mechaniky kontinua.

1.3.3 Dvě roviny stříhu a čtyři deformační pásma v TE

Prostá rovina stříhu je v TE kolmá k podélné ose vzorku ve srovnání s procesem ECAP, kdy jsou roviny skloněny s úhly v rozmezí 45° - 60° . Což umožňuje získat nové struktury s větší homogenitou zrna. Další rovina stříhu je rovnoběžná s osou vzorku. Kombinacemi technologií ECAP a TE dosahujeme zvýšení počtu možných deformačních cest [7].

Při zpracování materiálu metodou TE jsou pozorovány čtyři deformační pásma. Deformační pásmo 1 a 2 jsou umístěny v horní a dolní části vzorku (obr. 1.16). Způsob deformace v těchto zónách je prostý smyk v příčných rovinách (TP) jako

u HTP. Každé pásmo produkuje deformaci od $\varepsilon \sim 0.0$ (ve středu) do $\varepsilon \sim 0.5 - 0.7$ (na okrajích). Pásma jsou zobrazeny v obr. 1.17, který ukazuje závislost ekvivalentní deformace na souřadnicích podélné osy protlačování [7].



Obr. 1.17 Ekvivalentní deformace v závislosti na podélné ose protlačování (Z) pro znázorněné body příčného průřezu vzorku; $\beta = 55^\circ$, $\alpha = 70^\circ$.

Deformační pásmo 3 je umístěno v rotační části nástroje mezi pásmy 1 a 2, zahrnuje větší objem vzorku kromě vnější vrstvy silné 1 mm až 2 mm. Způsob deformace v pásmu 3 je prostý smyk v rotační podélně rovině (LP), která je indikována pozicí ukazatelů v příčném řezu (příčný řez B v obr. 1.16). Hodnota ekvivalentní deformace nahromaděné v této oblasti je v rozsahu 0.2 až 0.4 [7].

Deformační pásmo 4 je umístěno v rotační části nástroje ve vnější vrstvě (1 mm – 2 mm silné) vzorku mezi pásmy 1 a 2 (obr. 1.16). V této zóně se vyskytuje vícenásobný prostý smyk s ekvivalentní deformací $\varepsilon \sim 2$ na konci šroubovitě části kanálu (obr. 1.17) [7].

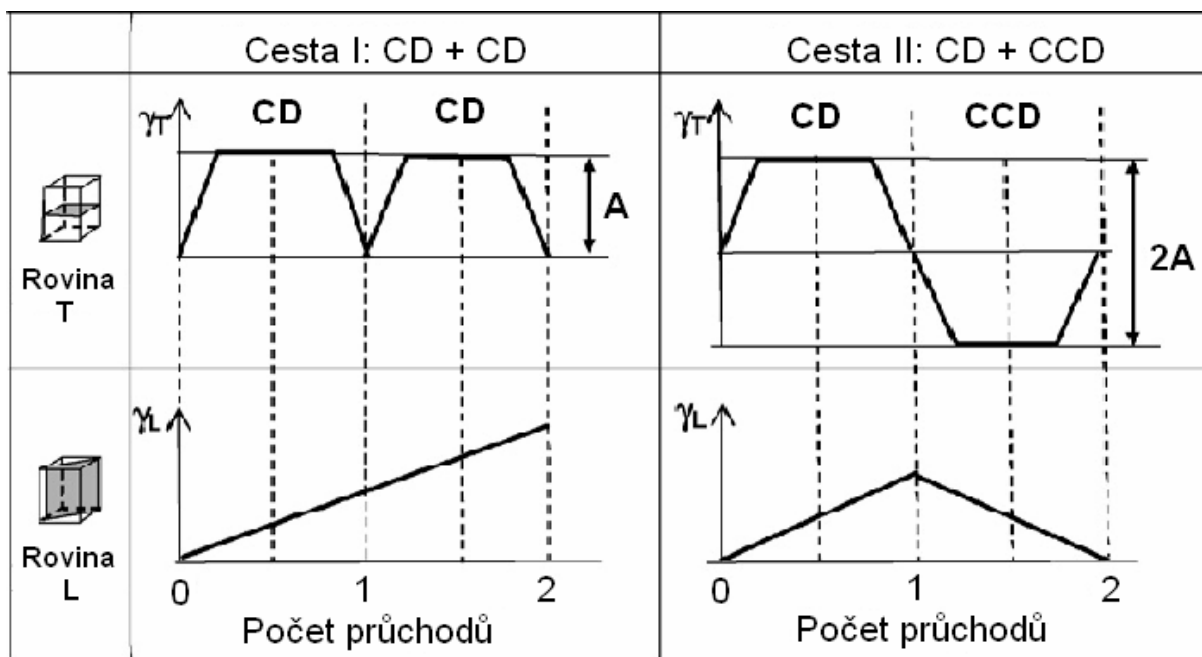
1.3.4 Dvě hlavní cesty při TE

Jsou zde dva typy rotace nástroje: ve směru hodinových ručiček (CD) a v protisměru otáčení hodinových ručiček (CCD). Při přechodu z CD k CCD se změní znaménko v každé ze čtyř deformačních pásem. To nám dává dvě hlavní cesty TE:

Cesta I: CD + CD (nebo CCD + CCD)

Cesta II: CD + CCD (nebo CCD + CD)

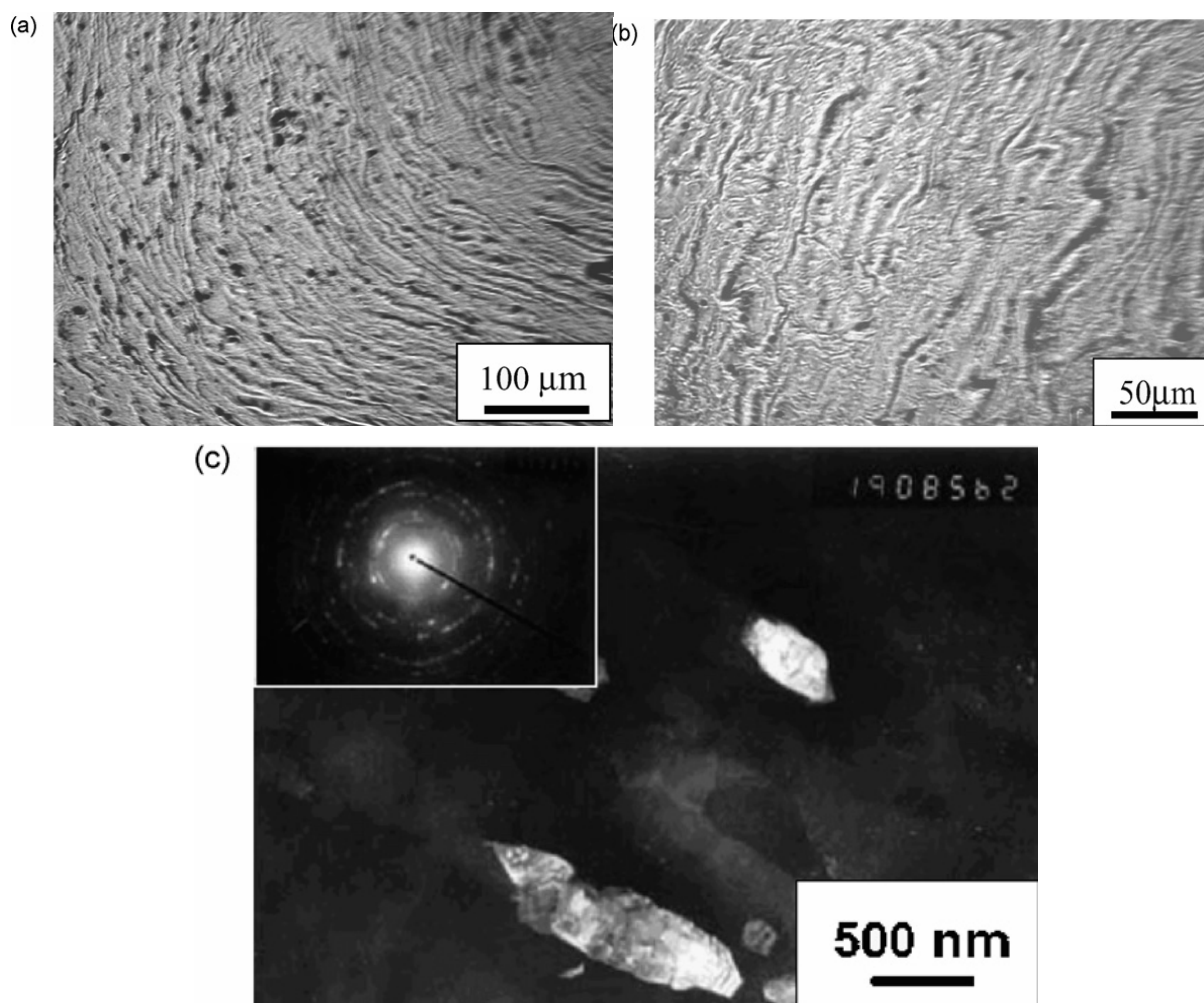
Obr. 1.18 schématicky ukazuje vyznačení významu změny v deformačním posunu podél průsečnice (γ_T) a podélné roviny (γ_L) během TE po cestě I a II. Cesta I dává cyklickou deformaci s amplitudou A , zatímco cesta II dává cyklickou deformaci s amplitudou $2A$. V podélné (axiální) rovině cesta I dává monotónní deformaci, zatímco cesta II dává cyklickou deformaci [7].



Obr. 1.18 Vyznačení významu změny v deformačním posunu podél průsečnice (γ_T) a podélné roviny (γ_L) pro cestu I a II.

1.3.5 Struktura a vlastnosti materiálů v průběhu více-průchodů TE

Použitím optické mikroskopie jsou znázorněny příčné řezy s typickou charakteristickou makrostrukturou s podélnými tvary zrn (ve směru spirály), které jsou centrovány do osy protlačování. V podélném řezu se tato makrostruktura podobá vířivému toku. Základní mikrostruktura po vícenásobném TE zpracování se vyznačuje submikroskopickou velikostí a vysokými úhly hranic, jak je ukázáno na obr. 1.19. Tato struktura poskytuje dobrou mez pevnosti a tažnost. V některých případech jsou vlastnosti struktury silně anizotropní. Anizotropie může být odstraněna změnou geometrie nástroje (úhel stoupání šroubovice), zvýšením provozní teploty, následnou překrystalizací tepelným zpracováním nebo také deformací - mechanickým zpracováním [7].



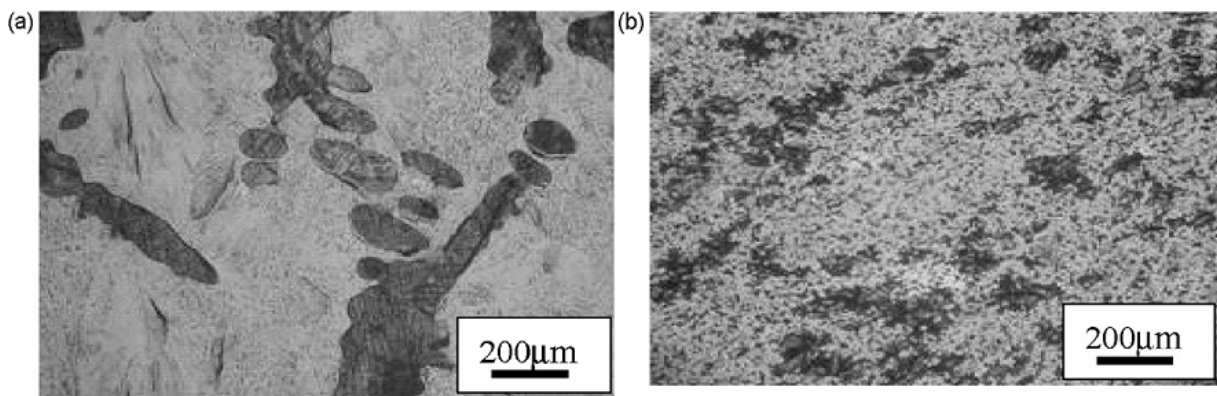
Obr. 1.19 Struktury vytvořené v Al-Mg-Sc-Zr slitině zpracované TE. Optické mikrosnímky (a,b); snímek elektronové mikroskopie s modelem SAED (c); zobrazení rýh kvůli vícenásobnému střihu v zóně 4 (b).

S rostoucím počtem TE průchodů, kdy už dochází k mezní deformaci (vyčerpání zásoby plasticity), je zvyšována homogenita struktury. Toto směřuje k ustálení mikrostrukturních změn a vlastností napříč příčným průřezem.

1.3.6 Nové možnosti přicházející s TE

Hlavní cesty při TE mohou být kombinované s některým SPD nebo tvářecím procesem (např. ECAP, válcování..), aby rozšířili prostor možných cest. Rozsah ekvivalentní deformace má u TE velký gradient. Stále ještě není dostatečně ověřen účinek deformačního gradientu na strukturu a vlastnosti materiálu, ale jsou důkazy které ukazují, že zvýšení gradientu může zintenzivnit zjemnění zrn v kovech a zvýšit jejich tažnost. To je zajímavý poznatek především pro výzkum účinku deformačního gradientu na vývoj materiálové mikrostruktury, stejně jako získání mikrostrukturních gradientů. Experimenty na Al slitinách vykazují zcela homogenní distribuci velikosti zrn a mikrotvrdost v příčném průřezu vzorku. Rozložení deformace a deformační hranice silně závisí na geometrii nástroje, úhlu stoupání β , úhlu rotace α mezi počátečními a konečnými příčnými řezy nástroje. Měněním těchto parametrů můžeme ovlivnit velikost deformace v různých pásmech vzorku. Především polotovary s obdélníkovým profilem zvyšují deformaci v pásmech 1 a 2, zatímco deformace klesá v pásmech 3 a 4. Jestliže má vzorek kruhový profil, jde o opačný proces. Snižuje se deformace v pásmech 1 a 2, zatímco se zvyšuje deformace v pásmech 3 a 4 [7].

Schopnost promísení jednotlivých strukturních fází je charakteristickou vlastností TE, která může být využita pro homogenizaci kompozitních materiálů (obr. 1.20).



Obr. 1.20 Zobrazení homogenizace během TE protlačování za tepla: počáteční stav (a); stav po druhém průchodu TE cestou II (b).

1.3.7 Srovnání TE a ECAP

Srovnání je založené na datech, které byly získány z výzkumu s použitím stejného materiálu (99,9% Cu). Pro rozsah mechanických vlastností byl použit index odchylky V (4) vyjádřený jako poměr směrodatné odchylky SD k průměrné hodnotě parametru \bar{x} :

$$V = \frac{SD}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Jak je uvedeno dříve odhadovaná skutečná deformace po jednom TE průchodu je $\epsilon \sim 1.2$. V případě ECAP zpracování přes 90° razidlo je skutečná deformace $\epsilon \sim 1.15$ [6].

Po dvou průchodech je index V pro pevnostní vlastnosti po TE zpracování vyšší asi o 20% než po ECAP zpracování cestou Bc, ale asi dvakrát nižší než po ECAP procesu cestou C. Po čtyřech průchodech je index V pro TE a ECAP stejný pokud jde o cestu Bc u ECAP, ale stále mnohem menší než při ECAP cestou C [6].

Hodnota indexu V pro prodloužení je po dvou TE průchodech nižší o 75% než po dvou průchodech ECAP, ale stala se o 15% vyšší po čtyřech povolení. Střední hodnota pevnosti v tahu je po TE mírně vyšší než po ECAP cestou C, ale nižší než u ECAP cestou Bc. [6].

2. PROTlačOVÁNÍ SLITINY AlMn1Cu NÁSTROJEM ECAP

2.1 Slitina hliníku AlMn1Cu (AW - 3003)

Slitina je pevnější než čistý hliník při současném zachování vysoké tvárnosti, dobře chemicky a korozně odolná. Je velmi dobře svařitelná všemi způsoby. Tepelná a elektrická vodivost je nižší než u čistého hliníku. Používá se ve stavu měkkém nebo tvářeném za studena. Chemické složení slitiny AlMn1Cu je v tab.2.1, mechanické vlastnosti jsou v tab. 2.2.

Ze slitiny byla vyrobena sada vzorků o rozměrech 10 mm × 10 mm - 43 mm. Průměrná velikost zrna v příčném řezu byla okolo 200 μm v počáteční fázi.

Tab. 2.1 Chemické složení slitiny AlMn1Cu.

Chem. prvek	Mn	Fe	Si	Cu	Ostatní	Al
[%]	1,1	0,45	0,55	0,15	0,05	zbytek

Tab. 2.2 Mechanické vlastnosti slitiny AlMn1Cu po kontinuálním odlití.

Mechanické vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Mez pevnosti R _m	140 – 160	[MPa]
Mez kluzu R _p 0,2	80	[MPa]
Tažnost A ₅	30 - 32	[%]
Tvrdost podle Brinella	40	

2.2 Mazivo GLEIT - μ[®] HP 515

Při protlačování vzorku nástrojem ECAP byla na vzorek nanášena tenká vrstva maziva GLEIT - μ[®] HP 515, které je určeno pro tváření za studena.

GLEIT - μ[®] HP 515 je homogenní pasta světlé barvy s extrémně vysokým

podílem bílých synergicky působících pevných maziv. Jeho hlavními nosiči jsou speciálně zvolené minerální oleje. Má velmi dobrou odolnost proti velkým tlakům a vynikající separační účinky. Mazivo je ideální pro tváření s působením velkých sil a tlaků. Tabulka 2.3 udává vlastnosti maziva GLEIT - μ° HP 515.

Tab. 2.3 Vlastnosti maziva GLEIT - μ° HP 515.

Vlastnosti	Zkušební metoda	Výsledky	Jednotky
Barva	vizuálně	bílá/krémová	-
Základový olej		minerální	
Hustota	DIN 51757	cca. 1,3	[g/cm ³]
Penetrace	DIN 51804, B1.1	265 – 295	[mm/10]
Konzistentní třída	DIN 51818	2	
Rozsah teploty použití		-25 až +100	[°C]

2.3 Vlastní experiment protlačování nástrojem ECAP

Protlačování slitiny AlMn1Cu bylo provedeno na hydraulickém lisu DP 1600. Hydraulický lis je vybaven servopohonem umožňující pomocí řídicího systému a programu plynulou regulaci rychlosti tvářecího nástroje a tím i deformační rychlosti. Řídicí systém byl napojen na PC s programem M – Test 1.7. Všechny údaje získané ze snímačů (síla, dráha ...) jsou dále zpracovávány a vyhodnoceny na PC. Program umožňuje v reálném čase graficky zobrazit průběh zatěžování materiálu $F - \Delta l$ ($\sigma - \Delta l$) a po ukončení testu další zpracování získaných údajů. Technické parametry lisu jsou uvedeny v tab. 2.4. Prezentace pracoviště je zobrazena na obr. 2.1, detail nástroje s ohřívací manžetou a průtlačníkem na obr. 2.2.

Tab. 2.4 Parametry hydraulického lisu DP 1600.

Technické parametry	Hodnota	Jednotky
Jmenovitá tvářecí síla	1600	kN
Rychlost posuvu	max. 40	mm/min
Maximální zdvih	120	mm
Rozměry lisu	800 × 1700 × 1850	mm
Váha lisu	1550	kg



Obr. 2.1 Zobrazení pracoviště.



Obr. 2.2 Detail nástroje ECAP.

Materiál byl protlačován nástrojem ECAP skládající se ze dvou částí. V jedné části je vyfrézován kanál s rozměry 10 mm × 10 mm. Velikost vnějšího zaoblení kanálu $R_1 = 2,4$ mm, poloměr vnitřního zaoblení kanálu $R_2 = 0,2$ mm. Úhel přechodu dvou kanálů $\Phi = 90^\circ$, vychýlení kanálu je 0° . Výkres nástroje je přiložen v příloze č.1, autorem výkresu je Bc. Jan Kedroň. Obě tyto části jsou nalisovány do objímky, jak je vidět i na obr. 2.2.

Vzorek ze slitiny o rozměrech 10 mm × 10 mm - 43 mm, byl protlačován za teploty okolí $t_0 = 20$ °C. Rychlost protlačování byla $v = 40$ mm/min. K protlačování byla využita cesta typu B_C , jelikož je nejvhodnější k produkci homogenní struktury

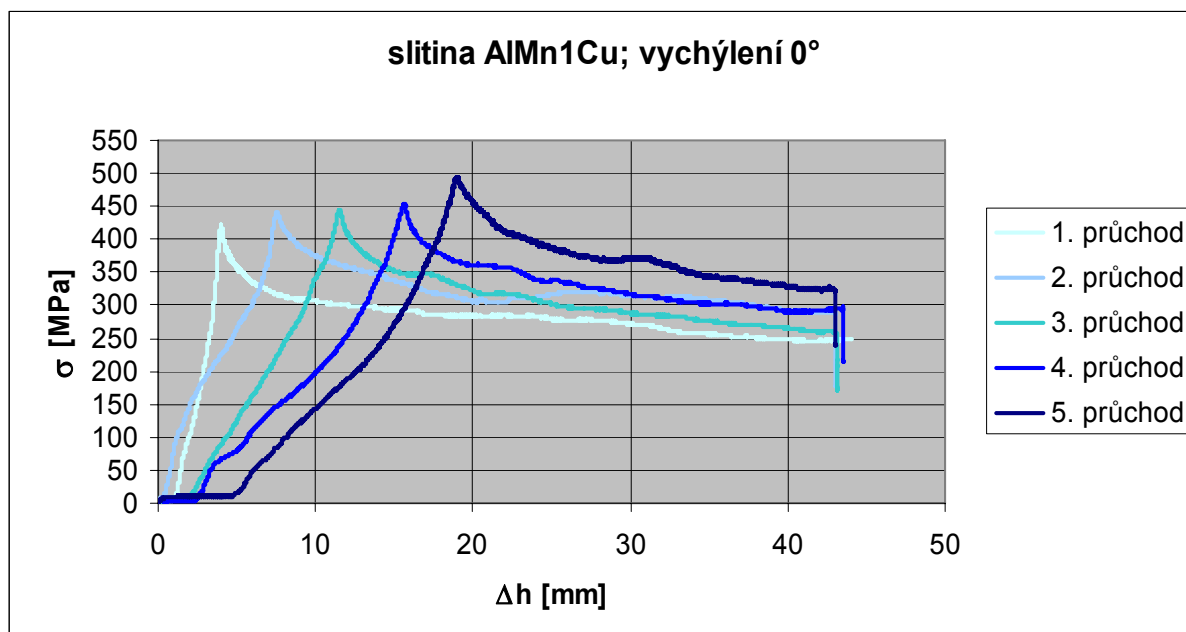
s vysokými úhly hranic zrn. Celková délka kanálu je větší než délka vzorku, proto vždy zůstávaly jeden až dva vzorky v kanálu. Vlivem geometrie kanálu nástroje docházelo k zešíkmení přední a zadní části vzorku. Po průchodu a vyjmutí vzorku z nástroje následovalo očištění od zbytků maziva. Vzorky po prvním a druhém protlačení byly zkráceny na délku 43 mm a mírně přebroušeny. U třetího až pátého průchodu nepřesahovaly protlačené vzorky délku 43 mm a nebylo je třeba zkracovat, byly jen přebroušeny na rozměr kanálu. Poté byl vzorek opětovně protlačen. Celkově bylo provedeno 5. průchodů cestou B_C. Vzorky po jednotlivých průchodech lze vidět na obr. 2.3.



Obr.2.3 Vzorky po jednotlivých průchodech.

2.4 Porovnání křivek přetvárného odporu pro jednotlivých průchodech

Během prvních dvou průchodů má křivka přetvárného odporu strmější náběh, v důsledku změny geometrie. Zkrácení vzorku je v místě zešíkmení, tudíž se pěchuje menší objem materiálu. V dalších průchodech už vykazují křivky přetvárného odporu pozvolnější nárůst až do svých maxim. Jednotlivé závislosti přetvárného odporu na dráze jsou vidět na obr. 2.4. Z křivek jde vidět postupné zpevňování materiálu, kdy je po prvním průchodu maximální hodnota přetvárného odporu $\sigma_p = 423,4 \text{ MPa}$ a po pátém průchodu $\sigma_p = 494,8 \text{ MPa}$. Maximální hodnoty σ_p jsou uvedeny v tab. 2.5.



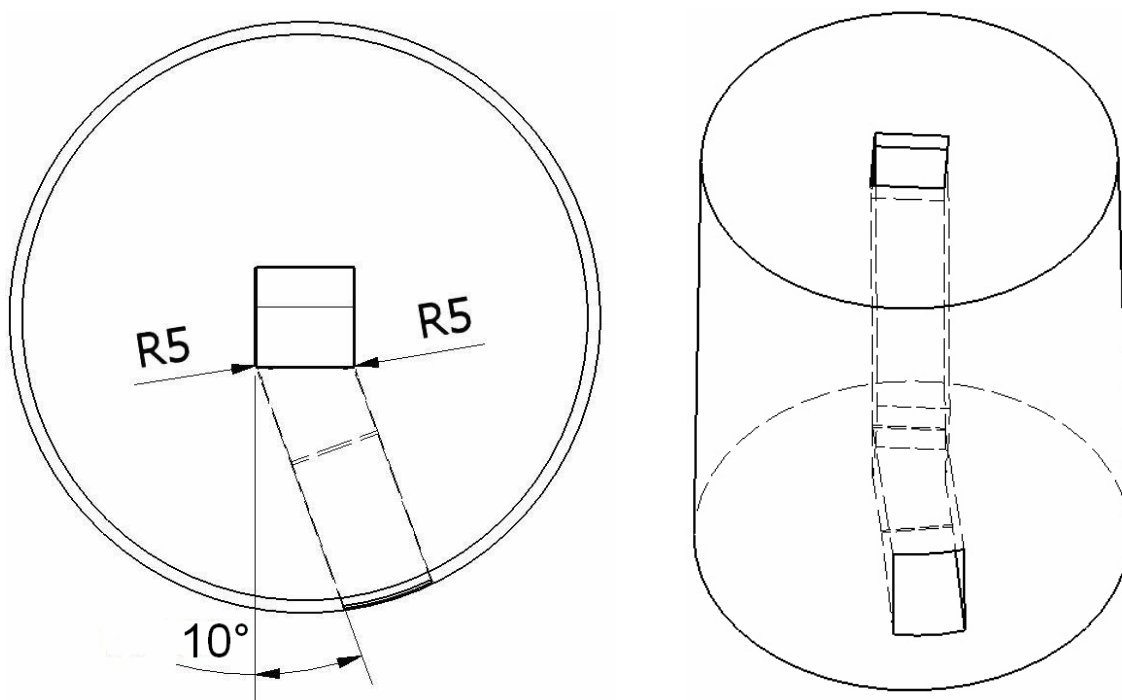
Obr. 2.4 Zobrazení křivek přetvárného odporu slitiny AlMn1Cu.

Tab.2.5 Hodnoty maximálního přetvárného odporu σ_{pmax} .

Počet průchodů	1	2	3	4	5
σ_{pmax} [MPa]	423,4	447,2	445,3	452,6	494,8

3. PROTLAČENÍ SLITINY AlMn1Cu KANÁLEM ECAP S VYCHÝLENÍM 10° V HORIZONTÁLNÍM SMĚRU

Kanál ECAP s vychýlením 10° představuje nové koncepční řešení umožňující daleko vyšší stupeň přetvoření pomocí změny cesty deformace v jednom průchodu nástrojem. Zvýšení stupně deformace vede k většímu zjemnění zrna a tím k celkovému zefektivnění procesu vícenásobné plastické deformace. Konstrukční úprava se týká horizontálního kanálu, který je vychýlen o 10° vzhledem k horizontální ose. Nový nástroj ECAP je zobrazen na obr. 3.1.



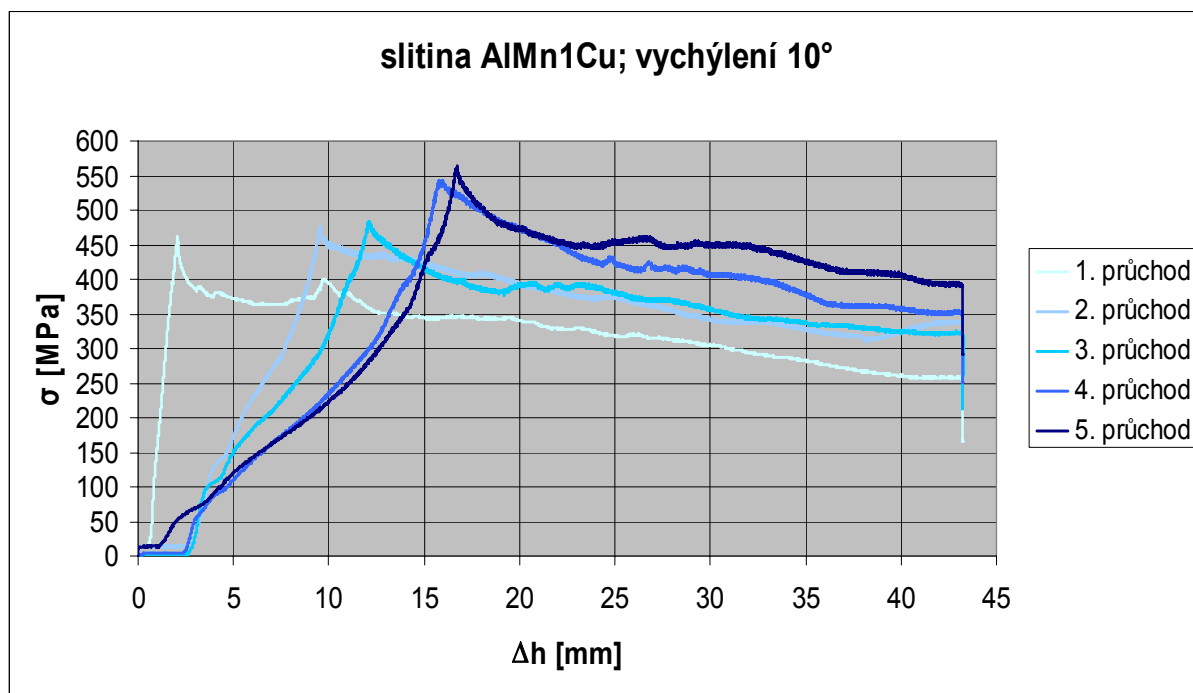
Obr. 3.1 Zobrazení nové koncepce nástroje ECAP s vychýlením 10° .

Nástroj se skládá také ze dvou částí, v jedné části je vytvořen kanál s rozměry $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$. Velikost vnějšího zaoblení kanálu $R_1 = 4 \text{ mm}$, poloměr vnitřního zaoblení kanálu $R_2 = 0,2 \text{ mm}$. Úhel přechodu dvou kanálů $\Phi = 90^\circ$, vychýlení kanálu je 10° . Detailní výkres nástroje je v příloze č. 2, autorem výkresu je Bc. Jan Kedroň. Obě tyto části jsou nalisovány do objímky stejně jako nástroj bez vychýlení.

Protlačování probíhalo za teploty okolí, tedy $t_0 = 20\text{ °C}$. Rychlost protlačování byla 40 mm/min. Vzorek měl stejné rozměry jako vzorek protlačovaný klasickým nástrojem ECAP, tedy 10 mm × 10mm – 43 mm. I zde docházelo k prodloužení vzorku během prvních dvou průchodů a mírnému zvětšení příčného průřezu vzorku. Vzorky byly očištěny od zbytků maziva, zkráceny na délku 43 mm a přebroušeny na původní rozměr. Vzorky po dalších průchodech nepřesahovaly délku 43 mm, nebylo je tak nutné zkracovat a byly pouze přebroušeny. Poté byly opětovně protlačeny. Celkově bylo provedeno 5. průchodů cestou B_C .

3.1 Porovnání jednotlivých křivek přetvárného odporu

U křivky přetvárného odporu pro první průchod je vidět strmý nárůst napětí. Tento jev lze vysvětlit tvarem vzorku pro první průchod, kdy nedošlo ještě k zešíkmení vstupní a výstupní části vzorku. Křivky pro druhý a třetí průchod mají podobný průběh, liší se pouze strmějším náběhem u druhého průchodu, což by mohlo být způsobeno zkracováním vzorku. Křivky po čtvrtém a pátém průchodu mají stejný náběh až po svá maxima. Mezi křivkami po třetím a čtvrtém průchodu došlo k nárůstu přetvárného odporu o 60,3 MPa, u křivek po čtvrtém a pátém průchodu došlo k nárůstu pouze o 20,4 MPa. Lze tedy usuzovat, že ve slitině dochází k nasycení deformace a další průchody už nebudou vykazovat takové zvýšení deformace a efektivitu zjemňování zrna. Jednotlivé závislosti přetvárného odporu na dráze jsou vidět na obr. 3.2. Hodnoty maximálních hodnot přetvárného odporu jsou uvedeny v tab. 3.1.



Obr. 3.2 Zobrazení křivek přetvárného odporu slitiny AlMn1Cu.

Tab. 3.1 Hodnoty maximálního přetvárného odporu σ_{pmax} .

Počet průchodů	1	2	3	4	5
σ_{pmax} [MPa]	460,7	476,6	481,8	542,1	562,5

4. OVĚŘENÍ VLIVU POČTU PRŮCHODŮ NA STRUKTURU PROTLAČOVANÉHO VZORKU

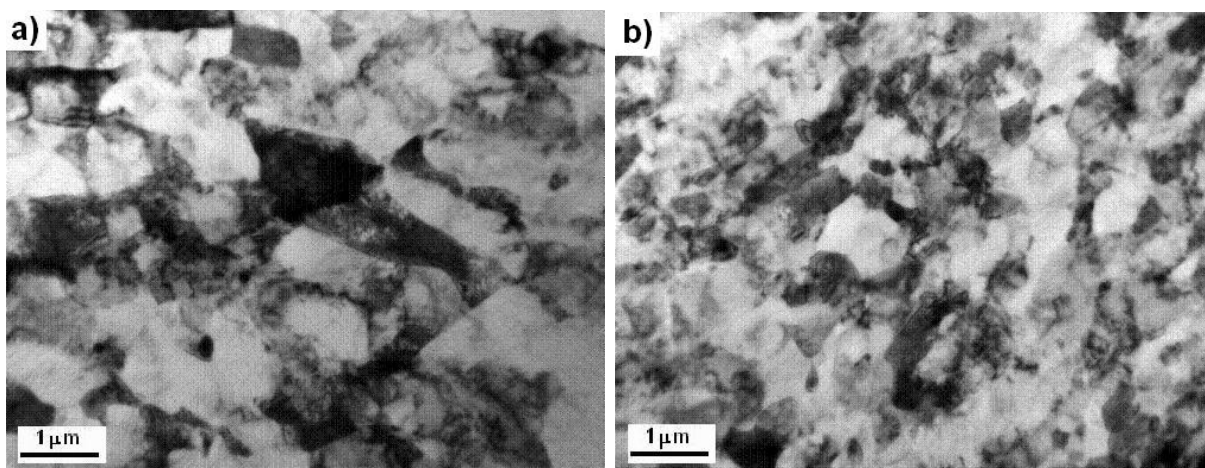
Velikost zrna byla analyzována na transmisním elektronovém mikroskopu (TEM). Příprava vzorků pro TEM a vyhodnocení struktury byla provedena ve spolupráci s Polskou akademií věd v Krakově.

4.1 Vliv počtu průchodů na strukturu protlačovaného vzorku u nástroje ECAP bez vychýlení

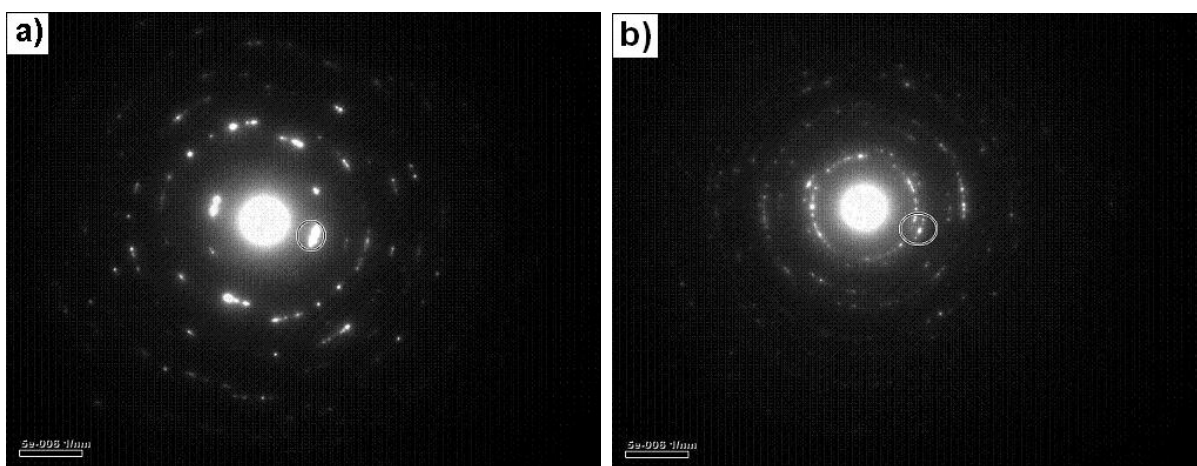
Pro nástroj ECAP bez vychýlení bylo prokázáno zjemnění velikosti zrna už po prvním průchodu, kdy se střední velikost zrna pohybovala mezi 1 μm až 2 μm . Také se prokázalo velké množství dislokací. Při pátém průchodu bylo dosaženo střední velikosti zrna v rozmezí 500 nm až 700 nm. Uvnitř zrn vznikaly malé defekty signalizující částečnou rekrystalizaci. Projevuje se zde větší heterogenita struktury. Obrázek 4.1 zobrazuje strukturu slitiny před průchodem nástrojem ECAP. Porovnání struktury slitiny po prvním a pátém průchodu je zobrazeno na obr. 4.2.



Obr. 4.1 Původní struktura slitiny AlMn1Cu.



Obr. 4.2 Porovnání velikosti zrn po prvním (a) a pátém (b) průchodu nástrojem ECAP bez vychýlení.



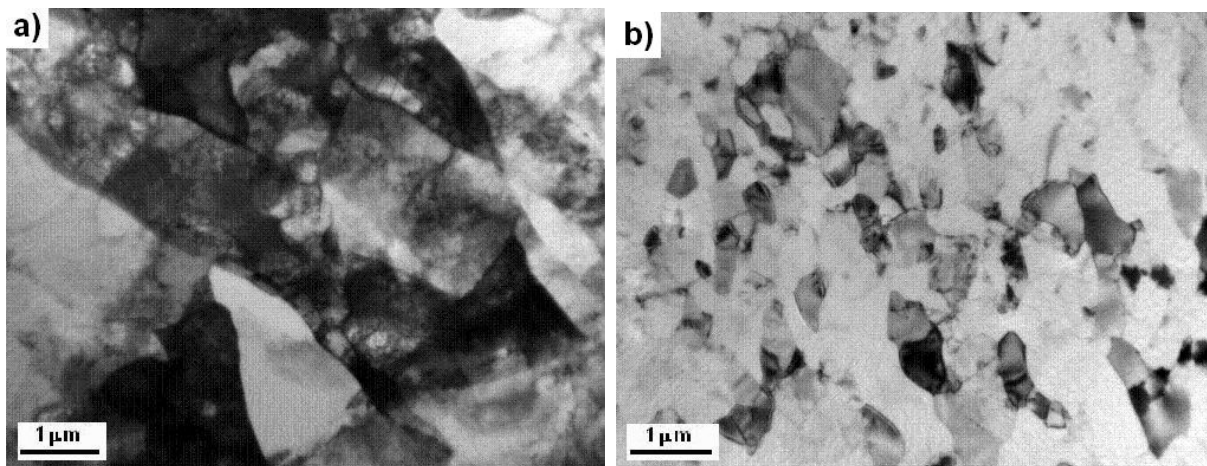
Obr. 4.3 Model SAED po prvním (a) a pátém (b) průchodu nástrojem ECAP bez vychýlení.

U modelu SAED (obr. 4.3) po pátém průchodu je zřetelně vidět rovnoměrnější rozložení difrakčních bodů, oproti prvnímu průchodu. Rovnoměrnější rozložení difrakčních bodů má vliv na tvorbu vysokých úhlů hranic zrn.

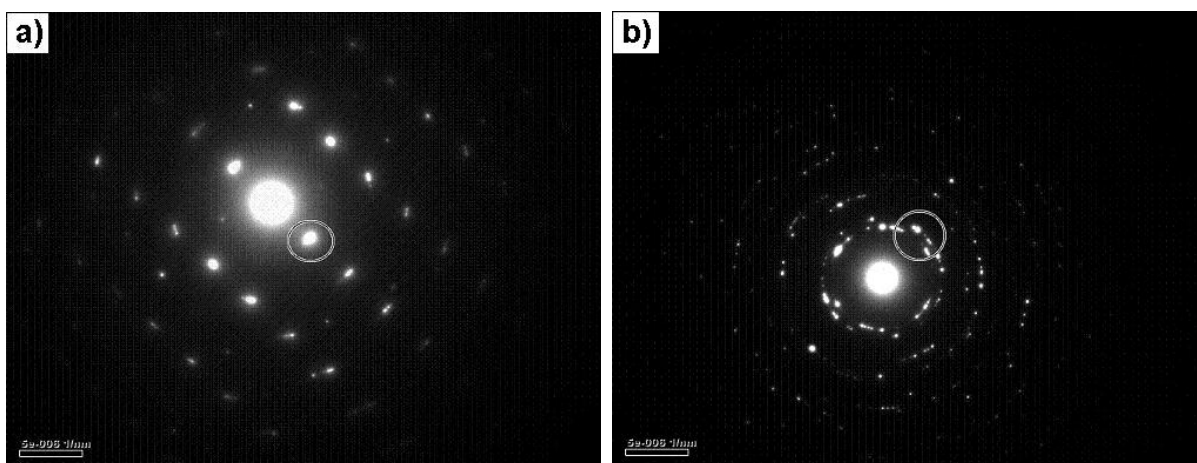
4.2 Vliv počtu průchodů na strukturu protlačovaného vzorku u nástroje ECAP s vychýlením 10°

Pro nástroj ECAP s vychýlením bylo taktéž prokázáno zjemnění velikosti zrna, které je podle předpokladu výraznější než u nástroje ECAP bez vychýlení. Po pátém průchodu bylo dosaženo střední velikosti zrna v rozmezí 200 nm – 400 nm s velkou

dezorientací zrn. Projevuje se zde zvýšená heterogenita materiálu. Na obr. 4.4 je porovnání dosažené střední velikosti zrn po průchodech nástrojem ECAP s vychýlením 10° .



Obr. 4.4 Srovnání dosažené střední velikosti zrna po prvním (a) a pátém (b) průchodu nástrojem ECAP s vychýlením 10° .

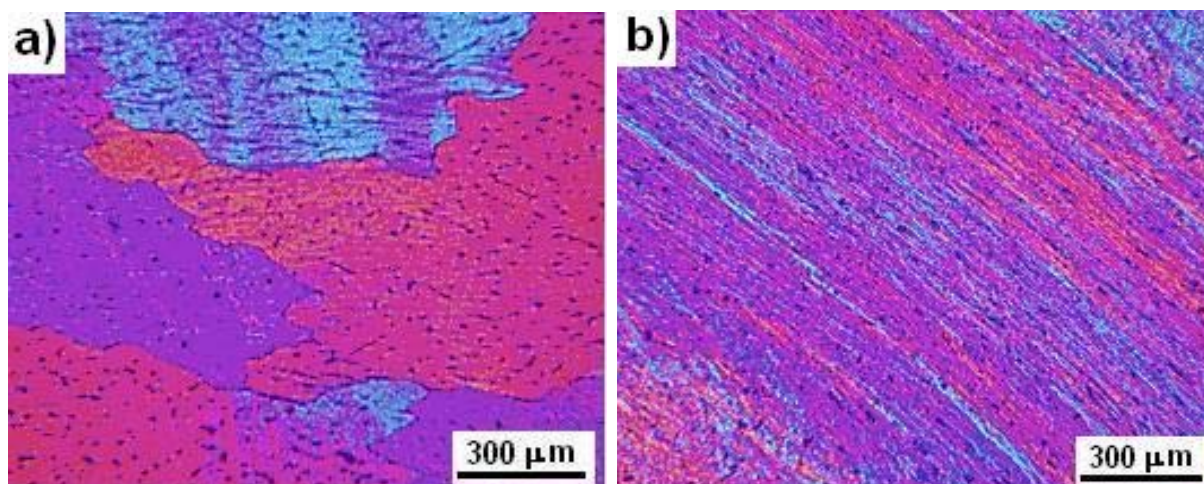


Obr. 4.5 Zobrazení modelu SEAD po prvním (a) a pátém (b) průchodu nástrojem ECAP s vychýlením.

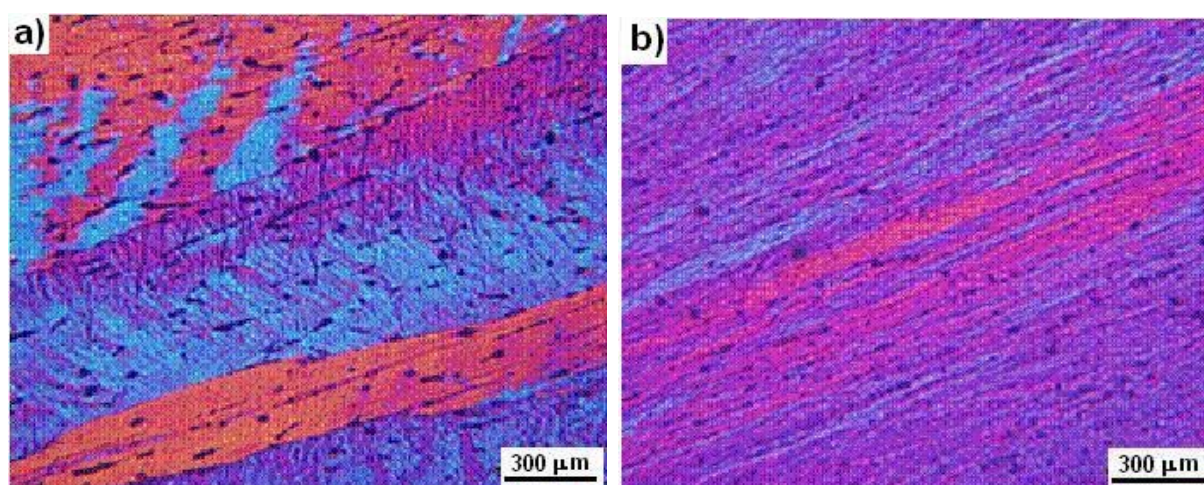
U modelu SAED (obr. 4.5) pro nástroj ECAP s vychýlením je patrný vliv opakovaného protlačení. Zatímco u snímku po prvním průchodu je vidět značná nerovnoměrnost rozložení difrakčních bodů, u snímku po pátém průchodu je rozložení difrakčních bodů rovnoměrnější.

Z metalografických rozborů pro nástroj ECAP s vychýlením je patrné, že optickým mikroskopem není možné pozorovat dosaženou velikost zrna po jednotlivých průchodech. Dochází k velmi intenzivní deformaci, kdy se vytvářejí různé

systémy střížných rovin, ve kterých dochází k rozdrobení zrna. Nárůst těchto systémů je pozorovatelný zvláště u 3-tího, 4-tého a 5-tého průchodu. Při pátém průchodu je dosaženo celkové deformace $\varepsilon > 5$, vysoké nahromadění střížných systémů je vidět na obr. 4.6a a 4.6b.



Obr. 4.6a Příčný řez materiálu po průchodu nástrojem ECAP s vychýlením 10°. Snímek (a) zobrazuje první průchod, snímek (b) zobrazuje pátý průchod slitiny.



Obr. 4.6b Podélný řez materiálu po průchodu nástrojem ECAP s vychýlením 10°. Snímek (a) zobrazuje první průchod, snímek (b) zobrazuje pátý průchod slitiny.

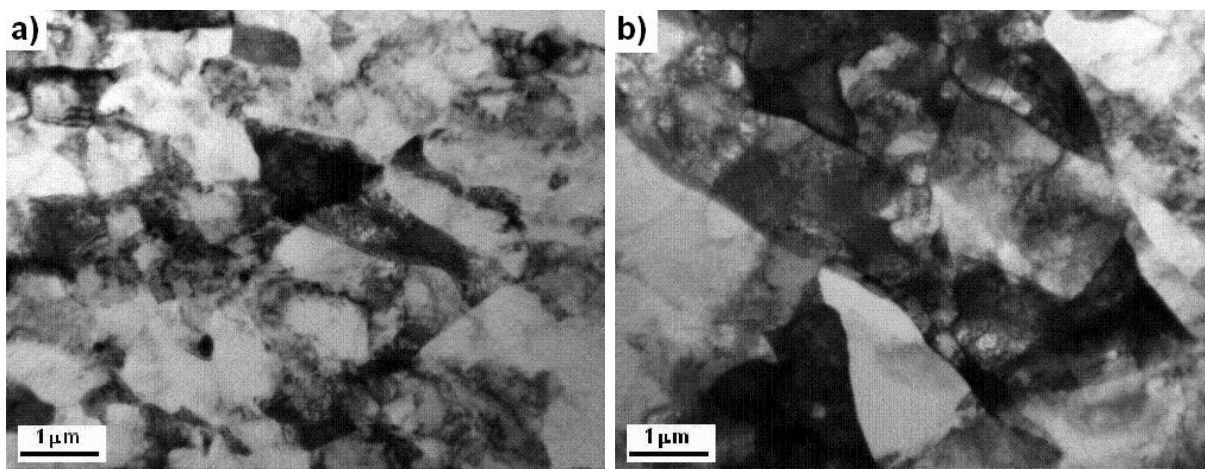
5. SROVNÁNÍ STŘEDNÍ VELIKOSTI ZRNA U KANÁLU ECAP BEZ VYCHÝLENÍ A S VYCHÝLENÍM PO 1. A 5. PRŮCHODU CESTOU Bc

Analyzovat velikost zrn pomocí optického mikroskopu se ukázalo jako nedostačující, pomocí této metody lze pozorovat pouze nahromadění střížných systémů ve kterých dochází k rozdrobení zrna.

Velikost zrn byla tedy analyzována pomocí transmisního elektronového mikroskopu (TEM). Kvůli náročnosti přípravy vzorků pro TEM byly analyzovány pouze snímky po prvním a pátém průchodu. Ale i z těchto snímků lze vyvodit závěry ohledně vlivu vychýlení kanálu na velikost zrn.

5.1 Srovnání střední velikosti zrna po prvním průchodu

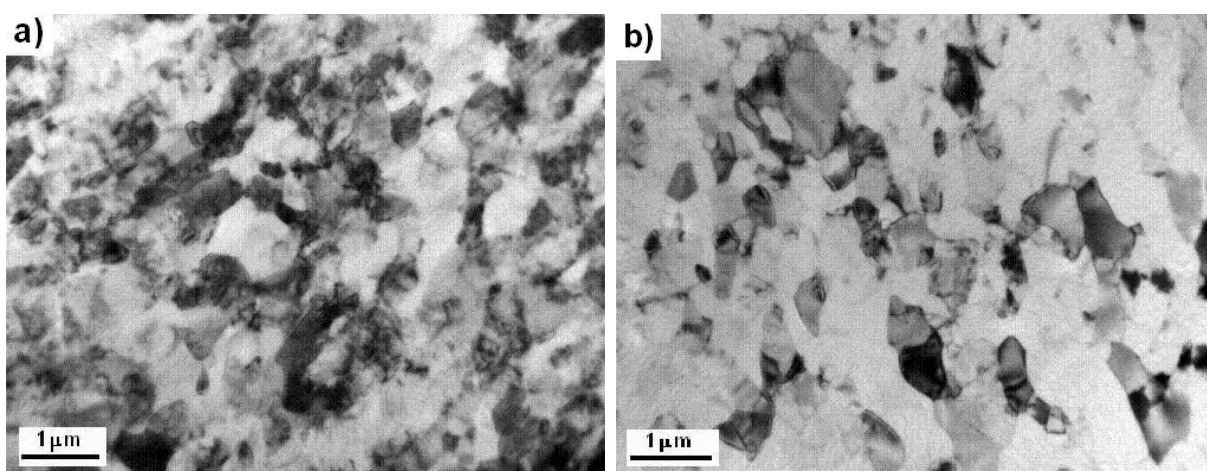
Ze snímků po prvním průchodu (viz obr. 5.1) není zcela jednoznačný rozdíl mezi velikostí zrna. Z porovnání křivek přetvárného odporu pro první průchod lze konstatovat, že mají podobný průběh a tudíž lze předpokládat shodnou velikost zrn. Toto tvrzení lze podložit výsledky matematické simulace v programu QForm, která probíhala souběžně s praktickým výzkumem. Intenzita deformace pro první průchod nástrojem ECAP bez vychýlení byla $\epsilon = 1,15$, intenzita deformace pro nástroj ECAP s vychýlením 10° byla shodná, tedy $\epsilon = 1,15$.



Obr. 5.1 Srovnání velikosti zrn po prvním průchodu nástrojem ECAP bez vychýlení (a) a s vychýlením (b).

5.2 Srovnání střední velikosti zrna po pátém průchodu

Ze snímků po pátém průchodu (viz obr. 5.2) je zřejmý rozdíl mezi velikostí jednotlivých zrn. Pro dosažení optimální mikrostruktury je tedy nutné opakované protlačení. S každým dalším průchodem vzorku nástrojem ECAP dochází k vytváření nových střížných rovin a jejich vzájemnému protínání. Jak je vidět na snímcích z optického mikroskopu pro nástroj ECAP s vychýlením 10° na obr. 4.6a a 4.6b. Výsledkem tohoto procesu je zjemnění střední velikosti zrna v důsledku kumulace deformace.



Obr. 5.2 Srovnání velikosti zrn po pátém průchodu nástrojem ECAP bez vychýlení (a) a s vychýlením (b).

Z křivek přetvárného odporu pro pátý průchodu je zcela zřejmý nárůst deformačního napětí u nástroje ECAP s vychýlením 10° . Pro nástroj bez vychýlení dosahuje hodnota přetvárného odporu $\sigma_p = 494,8$ MPa, pro nástroj s vychýlením je $\sigma_p = 562,5$ MPa. Jde tedy o nárůst 13,8%. I zde lze podložit výsledky praktického výzkumu výsledky matematické simulace. Nástroj bez vychýlení dosahuje intenzity deformace $\varepsilon = 4,2$ a nástroj s vychýlením dosahuje intenzity deformace $\varepsilon = 5,1$. Jde tedy o značný nárůst intenzity deformace u nástroje ECAP s vychýlením a tím spojené zjemnění struktury.

Počáteční střední velikost zrna slitiny AlMn1Cu byla 100 μm až 200 μm. U nástroje ECAP bez vychýlení bylo dosaženo po prvním průchodu střední velikosti zrn 1 μm až 2 μm. Po pěti průchodech dosahovala střední velikost zrna 500 nm až

700 nm. U nástroje ECAP s vychýlením bylo po prvním průchodu dosaženo podobné velikosti zrna, jako u nástroje bez vychýlení. Po pěti průchodech dosahovala střední velikost zrna 200 nm až 400 nm.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo vyhodnocení vlivu geometrie nástroje ECAP s klasickým a upraveným kanálem na velikost středního zrna u slitiny AlMn1Cu. U obou nástrojů se podařilo uskutečnit požadovaný počet průchodů a tak jsem mohl uskutečnit srovnání výsledné mikrostruktury. Z hlediska náročnosti výroby vzorků pro TEM jsem mohl porovnat jen snímky po prvním a pátém průchodu. Nepodařilo se mi tak popsat vývoj zjemňování zrna během jednotlivých průchodů.

Bylo prokázáno, že vychýlení nástroje má významný vliv na zvětšení střížné deformace a tím i na velikost zrna. Po prvním průchodu materiálu nástrojem ECAP vykazoval průběh křivek přetvárného odporu podobné hodnoty a velikost zrna. S dalšími průchody se hodnoty křivky přetvárného odporu začínají výrazněji lišit. Výsledná mikrostruktura po pátém průchodu nástrojem ECAP s vychýlením 10° ukazuje intenzivnější zjemnění zrna oproti klasické koncepci nástroje ECAP. Dochází tak k celkovému zvýšení efektivity procesu vícenásobné plastické deformace.

Zároveň byl prokázán vliv počtu průchodů na strukturu protlačovaného materiálu. S každým dalším protlačením dochází k navýšení střížné deformace a tím k zjemnění struktury materiálu. Celkem bylo analyzováno pět průchodů nástrojem ECAP. Další výzkum bude orientován na diagnostiku mechanických vlastností a tvárnosti protlačených vzorků. Další práce budou zaměřeny na zefektivnění procesu vícenásobné plastické deformace.

Dle mého zadání jsem splnil všechny body bakalářské práce v podobě vypracování rešerše současného stavu vývoje technologií SPD. Bylo provedeno protlačení slitiny AlMn1Cu nástrojem ECAP bez vychýlení i s vychýlením 10° . Na základě analýzy výsledků protlačené slitiny byl ověřen vliv počtu průchodů na strukturu protlačované slitiny a následně byl analyzován vliv vyosení kanálu ECAP na dosaženou střední velikost zrna po 1. a 5. průchodu.

Poděkování

Hlavní poděkování patří mému vedoucímu bakalářské práce panu prof. Ing. Stanislavu Ruszovi, CSc. z VŠB – TU Ostrava, dále pak panu Bc. Jiřímu Hluchníkovi za pomoc při řešení praktické části výzkumu a panu Bc. Janu Kedroňovi za poskytnutí výkresové dokumentace nástroje ECAP.

Seznam použité literatury

- [1] GROS, P. - HAN, Q. - CHAUDHURY, P. K. - CHERUKURI, B. - SRINIVASAN (PI), R. - SWENSON, D. Continuous Severe Plastic Deformation Processing of Aluminum Alloys, *Final Technical Report*, (2006), p.68.
- [2] DVOŘÁK, J. - KRÁL, P. - SKLENIČKA, V. - SVOBODA, M. - VLACH, B. Effect of Processing Route on Microstructure and Mechanical Behaviour of Ultrafine Grained Metals Processed by Severe Plastic Deformation, *Materials Science Forum*, Vol. 482 (2005), p. 83 - 88.
- [3] ROSECHOVSKI, A. Processing Metals by Severe Plastic Deformation, *Solid State Phenomena*, Vols. 101 - 102 (2005), p. 13 - 22.
- [4] CHERUKURI, B. - SRINIVASAN, R. Optimization of the Equal Channel Angular Pressing (ECAP) Process for Strain Homogeneity, *Materials Science Forum*, Vols. 539 - 543 (2007), p. 3655 - 3660.
- [5] OLEJNIK, L. - RICHERT, M. - ROSECHOVSKI, A. Channel Configuration Effects in 3D-ECAP, *Materials Science Forum*, Vols. 503 - 504 (2006), p. 179 - 184.
- [6] BEYGELZIMER, Y. - KOROTCHENKOVA, I. - KORSHUNOV, A. - ORLOV, D. - POLYAKOV, L. - RESHETOV, A. - SYNKOV, A. - VARYUKHIN, V. - VEDERNIKOV, I. Features of Twist Extrusion: Method, Structures & Material Properties, *Solid State Phenomena*, Vol. 114 (2006), p. 69 - 78.
- [7] BEYGELZIMER, Y. - ORLOV, D. - SYNKOV, S. - VARYUKHIN, V. Useful properties of twist extrusion, *Materials Science and Engineering A* 503, (2009), p.14 - 17.

Seznam příloh

- [1] Výkres nástroje ECAP bez vychýlení *S 06 – 05 – 08*
- [2] Výkres nástroje ECAP s vychýlením 10° *S 06 – 06 – 07*
- [3] Médium s prací v elektronické podobě